MEMENTO TECHNIQUE DE L'EAU

TOME 1

Degrémont

SUEZ

1
L'EAU, ÉLÉMENT FONDAMENTAL

INTRODUCTION

Dans tout l'univers, il est une molécule que l'homme recherche avidement, car sa découverte dans l'atmosphère d'une planète lointaine libérerait aussitôt les rêves les plus fous de l'humanité.

Cette molécule, un modèle simple triangulaire la représente aisément avec la particularité d'un angle interatomique de 105°, dû à l'électro-négativité de deux de ses pôles, au lieu de 90° pour des liaisons strictement covalentes. Elle est caractérisée par un moment électrique mis en évidence par ses propriétés physiques et électriques.

Enfin, sa formule peut s'écrire de façon très simple: H_2O, l'eau.

Derrière ce mot, s'impose une image, née des derniers voyages spatiaux, celle d'une planète bleue: la Terre.

L'eau est la substance minérale la plus répandue à la surface du globe. Elle constitue l'hydrosphère. Son volume est estimé à 1370 millions de kilomètres cubes; on évalue de 500 000 à 1 million de kilomètres cubes le volume d'eau douce réparti entre les fleuves, les lacs et les eaux souterraines; les glaces des

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

calottes polaires représentent un volume de 25 millions de kilomètres cubes, également d'eau douce. Enfin, il y a 50 000 kilomètres cubes d'eau dans l'atmosphère sous forme de vapeur et de nuages. L'évaporation annuelle est estimée à 500 000 kilomètres cubes et les précipitations sur les continents à 120 000 kilomètres cubes par an.

Mais l'eau est surtout synonyme de vie biologique.

C'est le constituant majeur de la matière vivante. Il entre en moyenne pour 80 dans sa composition. Chez les animaux supérieurs, le pourcentage d'eau est compris entre 60 et 70 %. Des valeurs extrêmes de 98 % se rencontrent chez des organismes marins tels que la méduse ou certaines algues; par contre, les bactéries sporulées, forme de résistance et de vie ralentie, voient leur teneur en eau réduite à 50 %.

Élément majeur du monde minéral et biologique, l'eau est aussi le vecteur privilégié de la vie et de l'activité humaine. A l'heure actuelle, l'utilisation globale de l'eau, en additionnant les usages domestiques, industriels et agricoles, représente le chiffre impressionnant de 250 m^3 par an et par habitant. Et encore les disparités sont énormes: de 100 m^3 pour les pays en voie de développement à 1500 m^3 pour les Etats-Unis. Il est donc certain que les besoins en eau de l'humanité ne cesseront de croître.

Ceci implique la nécessité impérieuse de protéger l'eau. Il faut la traiter que ce soit pour produire une eau propre à la consommation ou à des usages spécifiques industriels ou pour limiter les rejets de pollution dans le milieu naturel.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. PHYSIQUE DE L'EAU

1.1.
LES TROIS ÉTATS

La structure de l'eau dépend de son état physique.

L'état gazeux (vapeur) correspond exactement à la formule H_20 et en particulier au modèle angulaire (figure 1).

Mais les états condensés (eau et glace) sont plus compliqués, et c'est cette complication qui explique leurs propriétés anormales.

A l'état solide, l'arrangement élémentaire consiste en une molécule d'eau centrale et quatre périphériques, l'ensemble affectant la forme d'un tétraèdre

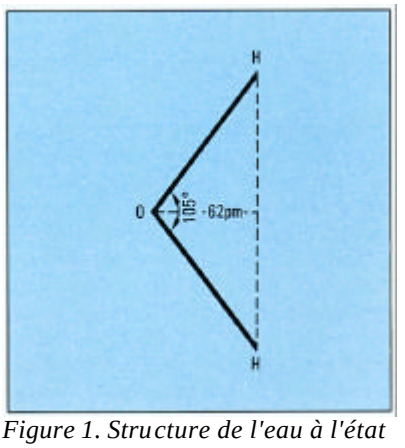


Figure 1. Structure de l'eau à l'état vapeur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

(figure 2). L'étude des variations cristallographiques, grâce au spectre Raman en particulier, permet de comprendre le passage à l'état liquide à partir de la constitution caverneuse de la glace.
A l'état liquide, il y a association de plusieurs molécules par des liaisons particulières dites liaisons hydrogène, chaque atome d'hydrogène d'une molécule d'eau étant lié à l'atome d'oxygène de la molécule voisine. Dans l'espace, la structure est tétraédrique.

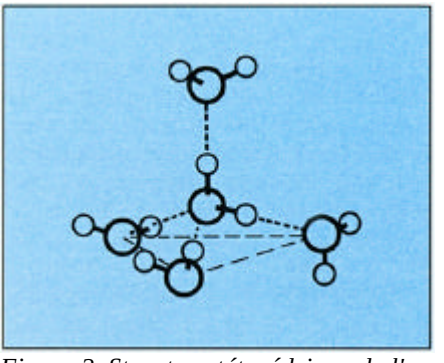


Figure 2. Structure tétraédrique de l'eau à l'état *solide*.

1.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Les propriétés physiques les plus intéressantes pour le traitement de l'eau sont les suivantes

1.2.1. Masse volumique

Par tassement de l'édifice moléculaire, la masse volumique varie avec la température et la pression.
Pour l'eau pure, cette variation est la suivante

T°C	*Masse volumique* kg. dm^{-3}	*T°C*	*Masse volumique* kg. dm^{-3}
0	0,99987	20	0,99828
4	1,00000	25	0,99707
10	0,99973	30	0,99567
15	0,99913	100	0,95838

Aux pressions rencontrées en pratique hydraulique, l'eau est considérée comme un fluide incompressible. Mais, en fait, c'est un fluide élastique: son volume décroît d'environ 0,048 % chaque fois que la pression augmente d'une atmosphère.
L'eau de mer, de salinité 35 $g.l^{-1}$, a une masse volumique moyenne de 1,0281 $kg.l^{-1}$ à 0 °C; une variation de salinité de 1 $g.l^{-1}$ fait varier la masse volumique de 0,0008 $kg.l^{-1}$.

1.2.2. Propriétés thermiques

.Chaleur massique: 4,18 kJ/kg.°C (1 kcal/kg. °C) à 0°C. Elle varie avec la température en présentant un minimum à + 35 °C.

. **Les chaleurs latentes** de transformation sont pour la fusion de 330 kJ . kg^{-1} (ou 79 $kcal.kg^{-1}$) et pour la vaporisation 2250 $kJ.kg^{-1}$ (ou 539 $Kcal.kg^{-1}$) à la pression normale et à 100 °C.
L'importance de la chaleur massique et de la chaleur latente de vaporisation fait que les grandes étendues d'eau à la surface de la terre constituent de véritables volants thermiques. C'est également la raison de l'utilisation de l'eau comme fluide caloporteur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.3. Viscosité

C'est la propriété qu'a un liquide d'opposer une résistance aux divers mouvements soit internes, soit globaux, comme l'écoulement. Elle est à la base des pertes de charge et joue donc un rôle important en traitement d'eau. Elle diminue lorsque la température croit.

T°C	*Viscosité Dynamique ?* mPa. s	*T°C*	*Viscosité Dynamique ?* mPa. s
0	1,797	20	1,007
5	1,523	25	0,895
10	1,301	30	0,800
15	1,138	35	0,723

Par contre, elle augmente avec la teneur en sels dissous; l'eau de mer est donc nettement plus visqueuse que l'eau de rivière.

Salinité en ion Cl^- en $g.l^{-1}$	*Viscosité dynamique ?* à 20°C en mPa. s
0	1,007
4	1,021
8	1,035
12	1,052
16	1,068
20	1,085

La pression agit d'une façon tout à fait particulière sur la viscosité absolue de l'eau. Contrairement aux autres liquides, une pression modérée rend l'eau moins visqueuse aux basses températures: elle écrase en quelque sorte son organisation moléculaire. Lorsque la pression continue à croître, l'eau reprend une structure de liquide dépourvu de contrainte interne et suit la règle générale, c'est-à-dire que la viscosité croît avec la pression.

1.2.4. Tension superficielle

Elle caractérise une propriété des interfaces (surfaces limitant deux phases). Elle est définie comme une force de traction qui s'exerce à la surface du liquide en tendant toujours à réduire le plus possible l'étendue de cette surface.
Elle est telle qu'elle provoque une ascension capillaire de 15 cm à 18 °C dans un tube de 0,1 mm de diamètre.
La tension superficielle diminue avec l'augmentation de la température.

T°C	*Tension superficielle* 10^{-3} $N.m^{-1}$ $(dyn.cm^{-1})$	*T°C*	*Tension superficielle* 10^{-3} $N.m^{-1}$ $(dyn.cm^{-1})$
0	75,60	50	67,91
10	74,22	60	66,18
20	72,75	70	64,4
30	71,18	80	62,60
40	69,56	100	58,9

L'addition de sels dissous augmente généralement la tension superficielle (? = 74,6 X 10^{-3} $N.m^{-1}$ pour une solution aqueuse de NaCl à 1 $mol.l^{-1}$, à 18 °C).
D'autres corps la diminuent, ils sont appelés tensio-actifs.

1.2.5. Pression osmotique
La pression osmotique traduit un phénomène qui s'établit entre des phases liquides de concentrations différentes séparées par une membrane semi-perméable.
Une équation simple relie pression osmotique et concentration
? = ACRT
OC : Différence de concentration en $mol.m^{-3}$
R : Constante des gaz parfaits
8,314 J/mol.K
T :Température en K
? : Pression osmotique en Pa

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ainsi l'eau de mer à 35 $g.l^{-1}$ en NaCI à 15°C crée une pression osmotique égale à 14,38 X 105 Pa.
Ce paramètre est essentiel dans le dimensionnement des systèmes d'osmose inverse.

1.2.6. Propriétés électriques

.**constante diélectrique**: la constante diélectrique de l'eau, de l'ordre de 80 Farad Stéradian par mètre, est l'une des plus élevées que l'on connaisse; c'est pourquoi l'eau possède un pouvoir ionisant très important,

. **conductivité électrique de l'eau**: l'eau est légèrement conductrice. La conductivité de l'eau la plus pure que l'on ait obtenue est de 4,2 microsiemens par mètre à 20 °C (correspondant à une résistivité de 23,8 mégohm-centimètre). Elle augmente lorsque des sels sont dissous dans l'eau (voir page 487) et elle varie en fonction de la température.

1.2.7. Propriétés optiques

La transparence de l'eau dépend de la longueur d'onde de la lumière qui la traverse. Si l'ultraviolet passe bien, l'infrarouge, si utile au point de vue physique et biologique, pénètre à peine. L'eau absorbe fortement l'orangé et le rouge dans le visible, d'où la couleur bleue de la lumière transmise en couche épaisse.
Cette transparence est souvent utilisée pour apprécier certaines formes de pollution et, en conséquence, l'efficacité des traitements d'épuration.

1.3. ÉTATS DES IMPURETÉS DANS L'EAU

L'eau rencontrée dans la nature, et, a fortiori, celle qui fait l'objet d'un traitement, n'est jamais pure.
Les impuretés qu'elle renferme, sous les trois états: solide, liquide ou gazeux, peuvent être caractérisées par la taille qu'elles prennent en solution dans l'eau (figure 3). Cette taille peut être celle d'une particule isolée ou celle d'un amas structuré. Le degré d'hydrophobicité des impuretés joue un rôle important dans ces structures.

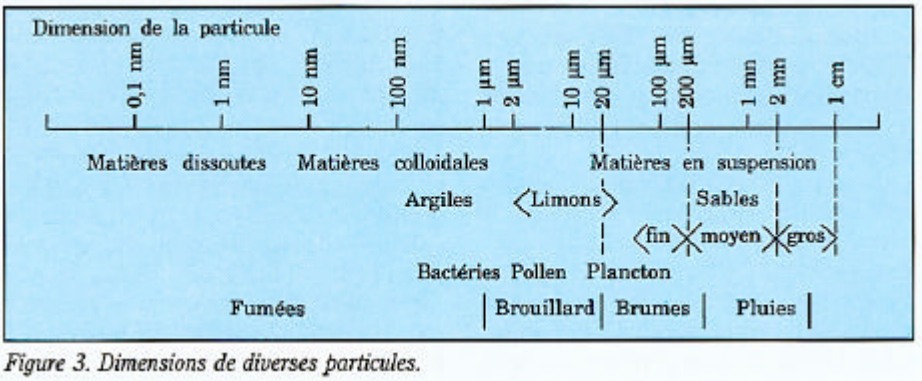


Figure 3. Dimensions de diverses particules.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

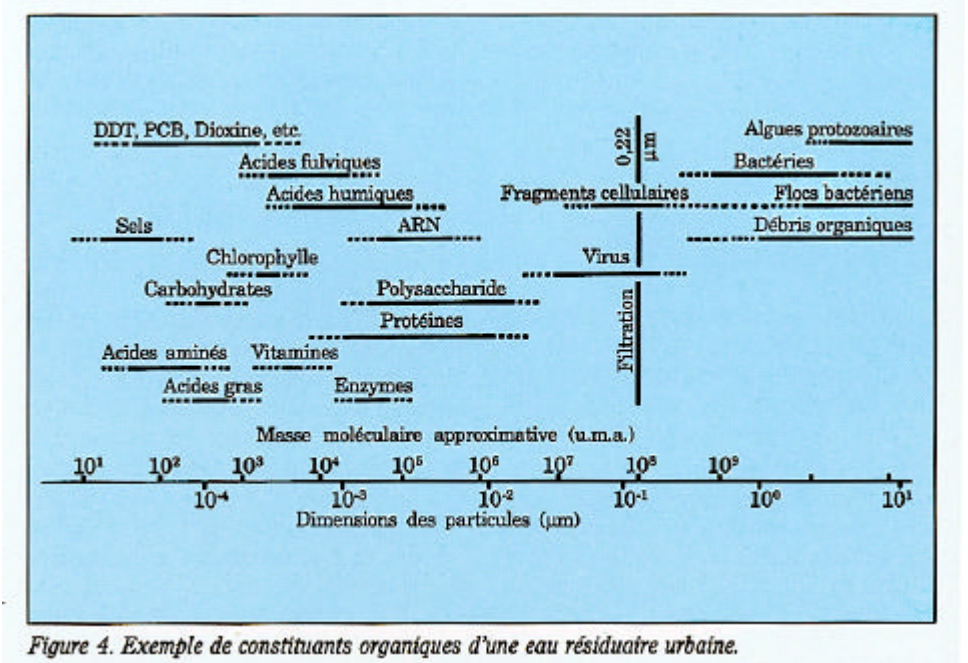


Figure 4. Exemple de constituants organiques d'une eau résiduaire urbaine.

La figure 4 donne les dimensions des particules et masses molaires pour les principaux constituants organiques d'une eau usée domestique.
Le classement suivant des solutions peut être retenu.

. **Solutions vraies ou moléculaires :** elles comprennent des systèmes homogènes (à une seule phase).
- solutions cristalloïdes: les particules dissoutes sont des molécules de petites dimensions (moins d'un nanomètre), ionisées (acides, bases, sels) ou non (sucres...) ;
- solutions macromoléculaires: formées de particules dépassant largement le nanomètre. Elles peuvent comporter des groupements ionisés.

. **Solutions colloïdales:** on les appelle aussi solutions micellaires ou pseudo-solutions. Ce sont des systèmes à deux phases, nettement hétérogènes, où les particules dispersées sont des amas moléculaires de dimensions généralement comprises entre 0,5 et 500 nm (ou 100 mn). Elles peuvent présenter un trouble visible à l'oeil nu lorsqu'elles sont observées perpendiculairement à la direction du rayon lumineux, mais leur contribution à la turbidité de l'eau est négligeable. Le terme de "colloïde" est ainsi appliqué aux matières en suspension finement divisées, à forte surface spécifique, caractérisées par une charge électrostatique généralement négative.

. **Suspensions-Émulsions**: dès que les particules sont visibles au microscope optique, elles constituent des suspensions (solides) ou émulsions (liquides).
Ces particules en suspension sont responsables de la turbidité ou opacité de l'eau.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. CHIMIE DE L'EAU

L'énergie de formation de la molécule d'eau, 242 kJ.mol^{-1} (58 kcal.mol^{-1}), est élevée. Il s'ensuit que l'eau possède une grande stabilité. Cette stabilité, associée aux propriétés électriques et à la constitution moléculaire de l'eau, la rend particulièrement apte à la mise en solution de nombreux corps. La plupart des substances minérales peuvent se dissoudre dans l'eau, ainsi qu'un grand nombre de gaz et de produits organiques.

2.1. L'EAU SOLVANT

Dissoudre un corps, c'est détruire sa cohésion, laquelle est due à des forces électrostatiques ou coulombiennes qui peuvent être :

. **Interatomiques**

Fortes liaisons chimiques: liaisons de covalence (entre atomes), liaisons d'électrovalence ou ioniques (atome - électrons).

.**Intermoléculaires**

Liens de cohésion entre molécules (liaisons hydrogène).

. **Des forces attractives faibles,** (London, Van der Waals), qui assurent la liaison générale de l'ensemble.

L'attraction hydratante de l'eau (molécule bipolaire) revient à détruire complètement ou partiellement (en commençant par les plus faibles) les divers liens électrostatiques entre les atomes et les molécules du corps à dissoudre pour les remplacer par de nouveaux liens avec ses molécules propres, et à forger de nouvelles structures: il se produit une véritable réaction chimique (solvatation). Une solvatation complète est une dissolution.

2.1.1. Solubilité des diverses phases

. **Cas des gaz**

La solubilité des gaz obéit aux lois de Henry (voir page 276 et page 509).

A titre d'exemple à 10 °C, la solubilité des principaux gaz sous une pression de gaz pur égale à 10^2 kPa (1 bar), sont:

Gaz	Solubilité mg.l^{-1}
N_2	23,2
O_2	54,3
$C0_2$	2 318
H_2S	5 112
CH_4	32,5
H_2	1,6

Les anhydrides (CO_2, $S0_2$) et divers acides volatils (HCI...) se dissolvent, puis se combinent. Leur coefficient de solubilité est beaucoup plus important que ceux des autres gaz.

L'oxygène est plus soluble que l'azote les gaz dissous extraits d'une eau sont plus riches en oxygène que l'atmosphère initiale dont ils proviennent.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

. Cas des liquides

La molécule d'eau étant polaire, la solubilité d'un liquide dans l'eau dépend de la polarité des molécules du liquide considéré. Par exemple, les molécules qui comprennent des groupes OH^- (exemple: l'alcool, les sucres), SH^-, NH_2^-, étant très polaires, sont très solubles dans l'eau alors que d'autres liquides (les hydrocarbures, le tétrachlorure de carbone, les huiles et les graisses, etc.) non polaires, sont très peu solubles.

Il peut y avoir miscibilité partielle: par exemple, deux substances ne sont miscibles qu'au-dessus d'une température critique (température supérieure à 63,5 °C pour le mélange eau-phénol), ou au-dessous d'une limite inférieure (la triméthylamine n'est soluble en toutes proportions qu'en-dessous de 18,5 °C) ou entre deux températures critiques (le système eau-nicotine).

2.1.2. Hydrophilisation

Un même corps peut présenter des solubilités différentes vis-à-vis de divers solvants: par exemple le chlorure de sodium est beaucoup plus soluble dans l'eau que dans l'alcool, tandis que la paraffine est soluble dans le benzène et ne l'est pas dans l'eau.

La solubilité dans l'eau dépend de la nature du corps ou tout au moins de certains de ses groupements constitutifs ; on est ainsi amené à classer les groupements caractéristiques en hydrophiles (OH-CO-NH_2...) ou hydrophobes (CH_3-CH_2-C_6H_5).

Dans certains cas, la solvatation ou le simple mouillage se produisent par l'intermédiaire d'un troisième constituant appelé solubilisant pour les solutions vraies, peptisant pour les solutions colloïdales, stabilisant ou émulsionnant pour les émulsions et suspensions, agent de mouillage pour les actions de surface.

Ces intermédiaires créent de véritables liens entre le solvant et la substance à dissoudre, à maintenir en dispersion ou à mouiller (ils abaissent la tension superficielle).

Le lien côté solvant est dû à un groupe hydrophile tandis que le lien côté matière à transformer peut être un lien chimique (action des bases et acides forts), ou un lien de cohésion. Ces derniers se forment à partir des molécules dissymétriques (serai-hydrophiles). Une des extrémités, à une polarité comparable à celle de l'eau, est hydrophile, tandis que l'autre tend à s'associer (action des détergents, du phosphate trisodique, des agents de mouillage) aux molécules du corps à stabiliser ou à s'adsorber à sa surface. Il se forme alors des complexes d'agrégation ou d'adsorption plus hydrophiles.

. Perte d'hydrophilie

L'intermédiaire peut rompre le lien entre le solvant et le corps dissous, dispersé ou mouillé. Selon les cas, cet agent s'appellera précipitant, coagulant, floculant, épaississant, déprimant (du mouillage). Cette rupture peut être le résultat d'une action chimique: perte d'ions OH- ou de groupes ionisés. L'intermédiaire peut détruire le lien de cohésion semi-hydrophile en neutralisant la partie hydrophile ou en captant la partie hydrophobe à la surface, soit de bulles d'air (flottation), soit d'un adsorbant insoluble plus ou moins hydrophile.

La rupture peut être le résultat d'une neutralisation des forces électrostatiques (action des cations polyvalents et des polyélectrolytes ioniques).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.1.3. Concentration et activité

Les rapports entre soluté et solvant peuvent être exprimés de plusieurs façons

- **fraction molaire**: rapport du nombre de moles du soluté au nombre de moles total (solvant + soluté),
- **molarité**: nombre de moles dissoutes dans un litre de solution.

Les molécules d'un soluté se comportent dans le solvant comme le ferait un gaz dans un autre, et l'on a effectivement constaté qu'à très grande dilution du soluté, la loi des gaz parfaits s'appliquait correctement. Quand la concentration devient notable, les molécules dissoutes agissent moins que ne le ferait le même nombre de molécules de gaz parfait. On remplace la concentration (c) par l'activité [a] :

$$[a] = f(c)$$

f est appelé coefficient d'activité et tend vers 1 quand la solution est très diluée.

2.2. IONISATION

Un composé minéral dissous dans l'eau se dissocie plus ou moins avec apparition d'ions chargés négativement (anions) et positivement (cations). Le corps dissous est appelé électrolyte; il favorise le passage du courant électrique

$$AB \rightleftharpoons A^+ + B^-$$

Lorsque plusieurs électrolytes se trouvent dans une même solution, chacun se dissocie dans une certaine proportion et les ions libérés peuvent se combiner entre eux pour former des composés nouveaux. Si l'on dissout, par exemple, deux composés AB et CD, on trouvera en solution des molécules AB, CD, AD et CB en équilibre avec les ions A^+, B^-, C^+ et D^-. Cet équilibre peut se modifier (loi de Le Chatelier) dans la mesure où il se forme des composés insolubles, des complexes ou des gaz. Si, par exemple, le composé AD est insoluble, l'équilibre est presque totalement déplacé vers la droite, selon la réaction

$$AB + CD \rightleftharpoons AD + CB$$
$$CB \rightleftharpoons C^+ + B^-$$

Certains acides ou bases, même en solution relativement concentrée, sont entièrement dissociés. On les **appelle électrolytes forts.**

Exemple : $NaCl \rightleftharpoons Na^+ + Cl^-$

D'autres corps, comme l'acide acétique CH3COOH, ne sont que partiellement dissociés en solution. Ce sont les **électrolytes faibles.** On distingue l'acidité totale qui comprend tous les ions H^+ possibles, et l'acidité libre qui comprend les ions H^+ dissociés.

L'eau elle-même est partiellement dissociée en ions suivant la réaction réversible

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$$

Ainsi, dans l'eau, on trouve à la fois des molécules H_20 et des ions OH^- (ion hydroxyde) et H^+ (sous forme hydratée H_30^+ appelé ion hydronium).

. **Loi d'action de masse**

Soit une réaction chimique à l'équilibre

$$mA + nB \underset{2}{\overset{1}{\rightleftharpoons}} m'C + n'D$$

La vitesse de réaction dans le sens 1 est donnée par la relation :

$$V_1 = k_1[A]^m [B]^n$$

La vitesse dans le sens 2 est :

$$V_2 = k_2[C]^{m'} [D]^{n'}$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

[A], [B], [C] et [D] représentant les activités des composés en solution.
A l'équilibre $V_1 = V_2$, d'où

$$k_1[A]^m [B]^n = k_2[C]^{m'} [D]^{n'}$$

$$\frac{[A]^m [B]^n}{[C]^{m'} [D]^{n'}} = \frac{k_2}{k_1} = K$$

C'est la loi d'action de masse. K est appelé constante de dissociation thermodynamique. Pour plus de commodité, on utilise la notation pK = colog K. Des tableaux donnent les valeurs de pK (voir page 503).

Application de la loi d'action de masse à l'eau: notion de pH.

Elle s'écrit, en supposant les coefficients d'activité ionique égaux à 1:

$$\frac{(H^+)\ (OH^-)}{H_2O} = K$$

La dissociation étant toujours faible, la concentration des molécules d'eau est pratiquement constante et on peut écrire $(H^+)\ [OH^-] = K_e$.

La constante de dissociation (ou d'ionisation) de l'eau est de l'ordre de 10^{-14} $(mol.l^{-1})^2$ à 23 °C. Elle varie en fonction de la température

Température	Constante d'ionisation $K_e\ 10^{14}$	pK_e
0	0,12	14,93
18	0,59	14,23
25	1,04	13,98
50	5,66	13,25
100	58,5	12,24

Dans l'eau pure, on a

$$(H^+) = (OH^-) = 10^{-7}\ mol.l^{-}.$$

On utilise par convention l'exposant de la concentration en ions H^+ ou pH (potentiel fiel hydrogène)

$$pH = colog\ (H^+)$$

Le pH se mesure à l'aide d'indicateurs colorés ou, mieux, par une méthode électrométrique (pH mètre à électrode verre).

On appelle milieu acide une solution dans laquelle (H^+) est supérieur à 10^{-1} $mol.l^{-1}$ (pH < 7), milieu basique une solution où (H^+) est inférieur à 10^{-} $mol.l^{-1}$ (pH > 7).

. Force des acides et des bases en solution aqueuse

Un acide est un corps capable de céder des protons, c'est-à-dire des ions H^+. Une base est un corps capable de fixer ces protons. Il y a donc, en solution aqueuse, existence d'un couple acide base défini par l'équilibre suivant

$$Acide + H_2O \rightleftharpoons Base + H^+$$

En appliquant la loi d'action de masse et en considérant la concentration en molécules d'H_20 comme constante, on a:

$$\frac{[Base]\ [H^+]}{[Acide]} = K_A \text{ et } pK_A = colog\ k_A$$

K_A ainsi défini est appelé **constante d'affinité** du couple acide base.

Un acide est d'autant plus fort qu'il donne dans l'eau plus d'ions H^+, c'est-à-dire que K_A est grand ou pK_A plus petit. Une base est d'autant plus forte que K_A est plus petit. Ainsi, l'ion ammonium NH_4^+ est un acide faible où pK_A = 9,2. La base correspondante NH_40H est une base assez forte.

Les notions de pK_A permettent le calcul du pH des mélanges de solutions d'acide, de base et de sels correspondantes

- le pH d'une solution d'un acide à la concentration totale c est

$$pH = 1/2\ pK_A - 1/2 \log c$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- Le pH d'une solution d'une base est

$$pH = 7 + 1/2\ pK_A + 1/2 \log c$$

- le pH d'une solution d'un sel est

$$pH = 1/2\ pK_1, + 1/2\ pK_2$$

K_1 et K_2 étant les constantes d'affinité de l'acide et de la base correspondantes.

. Solution tampon

Dans le cas du mélange d'un acide de concentration (A) et de la base correspondante de concentration [B], si on a [A] = [B], cette solution est dite tampon.
Exemple: acide acétique - acétate
Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu, selon que l'on ajoute ou que l'on retire des ions H^+. Ces solutions sont intéressantes lorsqu'on a besoin qu'une réaction se fasse à pH constant

2.3. OXYDO-RÉDUCTION

L'eau peut participer, suivant les conditions expérimentales, à des réactions d'oxydoréduction avec comme réactions possibles

$$2H_2O - 4\ e^- \rightleftharpoons 4H^+ + O_2$$
$$2H_2O + 2\ e^- \rightleftharpoons 2OH^- + H_2$$

Dans le premier cas, l'eau est **donneur** d'électrons; elle est **réductrice**: l'accepteur d'électrons est un oxydant En présence de l'eau un oxydant libère de l'oxygène. Dans le deuxième cas, l'eau est un **accepteur** d'électrons; elle est **oxydante**: le donneur d'électrons est un réducteur. En présence de l'eau, un réducteur libère de l'hydrogène.
Mais les réactions sont très lentes en l'absence de catalyseurs et l'on peut en général négliger l'action de l'eau du point de vue oxydo-réduction.

Les acétates, les phtalates acides et les phosphates monopotassiques servent de base à la confection d'une gamme de solutions tampons.

. **Solubilité des composés peu solubles. Produit de solubilité**

La condition d'équilibre ionique d'un corps peu ou pas soluble est

$$AC \rightleftharpoons A^- + C^+$$
$$[A^-]\,[C^+] = K_s$$

K_S ou produit de solubilité est constant pour une température et une force ionique données de la solution. La valeur de K_S est d'autant plus petite que le corps est moins soluble. Pour le carbonate de calcium soluble à raison de 12 $mg.l^{-1}$, le produit de solubilité K_S égale $10^{-8,32}$ $(mol.l^{-1})^2$. Par analogie avec le pH on écrit
$pK_S = \text{colog}\ 10^{-8,32} = 8,32$

Toutefois, les oxydants ou réducteurs très forts réagissent sur l'eau avec une vitesse notable; par exemple, le chlore passe facilement à l'état d'anion Cl^- :

$$Cl_2 + 2\ e^- \rightarrow 2\ Cl^-$$

Avec l'eau

$$2\ Cl_2 + 2\ H_2O \rightarrow 4\ H^+ + 4\ Cl^- + O_2$$

avec dégagement d'oxygène et acidification du milieu.

L'eau peut se décomposer en oxygène et hydrogène selon la relation

$$2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + O_2$$

La neutralité oxydo-réductrice correspond à l'égalité des pressions d'oxygène et d'hydrogène. Elle correspond à une pression pH^2 égale à 10^{-22} Pa.
La notion de potentiel d'oxydo-réduction permet de classer par rapport à l'hydrogène et donc entre eux les divers oxydants et réducteurs (voir page 249).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. BIOLOGIE DE L'EAU

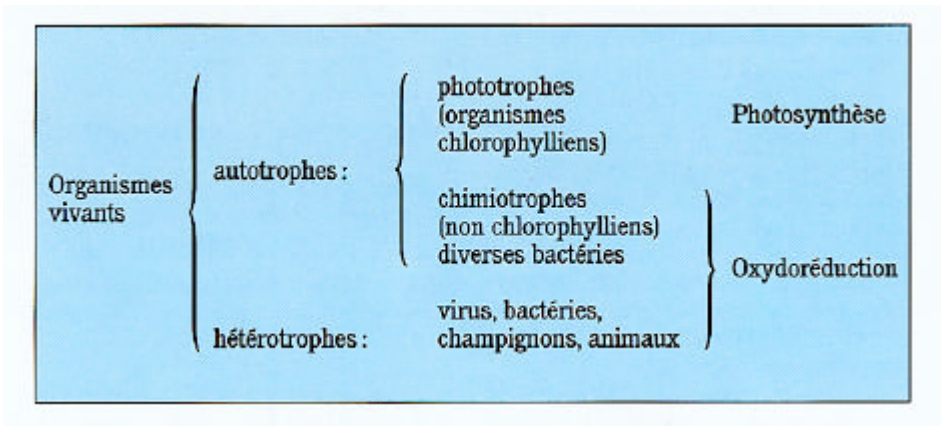
3.1. L'EAU ET LE MÉTABOLISME CELLULAIRE

C'est dans le milieu extérieur où elle vit que la cellule va chercher les substances indispensables, appelées encore métabolites essentiels, nécessaires au maintien du rythme de ses activités.

Certaines cellules sont capables d'en effectuer la synthèse à partir d'éléments minéraux; elles transforment l'eau, le gaz carbonique et les sels minéraux en leur propre substance d'une grande complexité moléculaire. Ce sont les cellules autotrophes qui prennent l'énergie nécessaire dans le milieu extérieur (énergie lumineuse ou énergie chimique provenant de la transformation de certains radicaux minéraux) et synthétisent des réserves utilisables à n'importe quel moment, constituant ainsi une énergie potentielle.

Les cellules hétérotrophes, au contraire, sont incapables de faire la synthèse de tous les facteurs de croissance et utilisent des substances nutritives qu'elles dédoublent et "oxydent" exothermiquement en matériaux plus simples: l'énergie libérée (énergie cinétique) au cours de ces réactions chimiques servira aux besoins de la cellule (croissance, locomotion, reproduction).

On désigne par métabolisme l'ensemble des diverses réactions énergétiques, en réservant le nom d'anabolisme lorsqu'il y a gain d'énergie potentielle (réaction endothermique) donc synthèse de matière vivante, et de catabolisme lorsqu'il y a gain d'énergie cinétique (réaction exothermique) donc dégradation de la matière nutritive.



L'étude des sources d'énergie peut donc se ramener à l'analyse de la photosynthèse et à celle des phénomènes d'oxydose réduction dans les fermentations.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

. Anabolisme

a) Photosynthèse

C'est le cas typique de la fabrication des glucides par les végétaux à partir du CO2 de l'atmosphère et de l'eau de la sève brute avec intervention de l'énergie solaire et en présence de chlorophylle qui peut se résumer par la relation globale

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O \rightleftharpoons C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$
$$-2{,}72\ kJ.mol^{-1}\ (-650\ cal.mol^{-1})$$

Ce processus biologique est quantitativement le plus important dans la nature.

b) Oxydo-réduction minérale

D'autres organismes autotrophes ne peuvent utiliser, faute de pigments fixateurs, l'énergie solaire; ils trouvent dans les phénomènes d'oxydo-réduction de corps minéraux l'énergie nécessaire à leur existence. On citera les bactéries du genre Nitrosomonas qui oxydent l'ammoniaque en nitrites, celles du genre Nitrobacter qui transforment les nitrites en nitrates, les bactéries ferrugineuses et manganifères qui oxydent les bicarbonates ferreux et manganeux en hydroxydes ferriques et manganiques, les bactéries sulfureuses qui transforment l'hydrogène sulfuré en soufre colloïdal, les bactéries sulfato-réductrices qui réduisent les sulfates en H_2S et les thiobacilles qui oxydent ce dernier en acide sulfurique.

. Catabolisme. Processus de fermentation

Le processus de dégradation des aliments cellulaires, ou catabolisme, implique la formation d'eau ou l'intervention des molécules d'eau dans des réactions d'oxydo-réduction organiques au cours desquelles est utilisée l'énergie chimique que comporte toute substance nutritive.

Les termes aérobie et anaérobie caractérisent le type de dégradation qui est, en fait, une déshydrogénation au sein de la cellule hétérotrophe. Si l'hydrogène se combine à l'oxygène moléculaire, le processus est dit **aérobie.** Si le processus implique, au contraire, le transfert de l'hydrogène du composé déshydrogéné à un accepteur d'hydrogène autre que l'oxygène moléculaire, il est anaérobie. D'où les notions de bactéries aérobies strictes, anaérobies strictes et anaérobies facultatives.

La décomposition (aérobie ou anaérobie) des substances organiques est assurée par des enzymes sécrétées par les organismes. Ce sont des protéines complexes possédant un arrangement spatial précis et auxquelles les molécules organiques ou substrat peuvent venir se fixer.

La spécificité des enzymes est liée à leur structure spatiale.

Le processus de dégradation biologique conduit, selon que l'on se place en aérobiose ou en anaérobiose, à des produits de dégradation ultime différents (voir page 286).

3.2. L'EAU, SIÈGE DE VIE MICROBIENNE

La science médicale et biologique a reconnu le rôle joué par l'eau dans l'apparition et la transmission de certaines maladies. Ceci a conduit à la découverte et à l'identification d'un ensemble d'organismes unicellulaires présents dans l'eau. Ceux qui sont responsables de maladies pathogènes sont très peu nombreux par rapport à la population microbienne totale. D'autres sont utilisés à des fins de production (métabolites...). Dans l'eau, les bactéries jouent un rôle particulièrement important

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Comme toutes les cellules vivantes, la cellule bactérienne comprend un noyau comportant principalement les chromosomes rassemblés dans la chromatine et constitués par l'acide désoxyribonucléique (ADN). Le noyau commande la reproduction, conserve le patrimoine génétique de la cellule sous forme codée et pilote au moyen d'ARN (acide ribonucléique) la synthèse des protéines et particulièrement des enzymes (celle-ci se produit dans le cytoplasme, gelée comportant des grains d'ARN, des ribosomes, ainsi que des organites divers: mitochondries, lysosomes, etc. au rôle bien défini.) La cellule est entourée d'une membrane rigide qui donne sa forme à la bactérie. Des cils ou flagelles existent dans le cas des espèces mobiles (fig. 5).

Le rapport surface/volume est plus élevé que chez les autres organismes. Or, le taux de métabolisme s'élève avec ce rapport une bactérie est plus active que les organismes plus ordonnancés. La vitesse de reproduction est fonction de la concentration en matières nutritives du milieu. Dans les meilleurs cas, on a pu observer une division cellulaire en 15 à 30 minutes; parfois, elle nécessite plusieurs jours. Cette vitesse dépend de la température.

Les bactéries ne vivent que dans des milieux répondant à certaines caractéristiques: teneur en eau, pH, salinité, potentiel d'oxydo-réduction, température. Le potentiel d'oxydo-réduction favorable est assez variable suivant que les bactéries travaillent en aérobiose ou en anaérobiose. Ces conditions sont en relation étroite avec la composition du complexe enzymatique sécrété par la bactérie. Des variations importantes dans les caractéristiques du milieu peuvent entraîner une sélection des espèces.

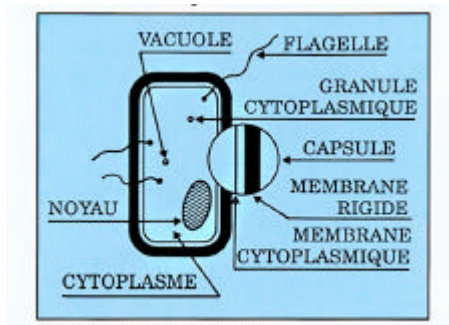


Figure 5. Cellule bactérienne.

Les bactéries, selon la température optimale pour leurs enzymes, peuvent être classées en **thermophiles** (température supérieure à 40 °C), en **mésophiles** (température voisine de 30 °C), en **psychrophiles** (de 0 à 15 °C) et en **cryophiles** (de - 5 à 0 °C),

Certaines espèces bactériennes peuvent présenter une forme particulière par sporulation : les spores qu'elles engendrent sont des cellules de vie ralentie d'une constitution telle qu'elles résistent beaucoup mieux à la chaleur, à la sécheresse, par exemple. Lorsque les conditions redeviennent normales, les spores germent et redonnent des bactéries actives.

Une culture bactérienne complexe peut s'adapter par sélection et mutation â des changements lents de la composition du substrat dont elle se nourrit.

3.3. SUBSTANCES NUTRITIVES

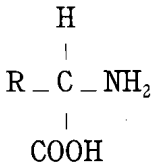
3.3.1. Substrats carbonés

Pour les organismes hétérotrophes, les principaux substrats nutritifs sont les protides, les glucides et les lipides.

Les **protides,** constituants les plus importants de la matière vivante, sont à

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

la base de la matière protoplasmique et cytoplasmique. Ils sont constitués par un assemblage de corps simples: les **acides aminés.** Un acide aminé est une substance présentant dans sa molécule un ou plusieurs groupements acides COOH et un ou plusieurs groupements aminés NH_2 liés au même atome de C



Les oligo-éléments proprement dits sont principalement des cations ou des anions. Des concentrations de l'ordre du microgramme par litre dans les milieux de croissance sont amplement suffisantes

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

pour répondre aux besoins cellulaires. Ces éléments deviennent rapidement toxiques à des teneurs plus élevées. Ils contrôlent de nombreux phénomènes dans la cellule comme le gradient ionique transmenbranaire (Na^+), ils interviennent aussi pour structurer certaines macro-molécules associés à des complexes enzymatiques.

Le besoin en ces éléments est commun à tous les groupes bactériens mais certains sont très spécifiques de telle ou telle famille bactérienne. Ainsi le nickel est spécifiquement lié aux enzymes contrôlant la méthylation de l'acétate chez les bactéries méthanogènes et donc indispensable au bon fonctionnement de la fermentation méthanique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. LANGAGE DE L'EAU

Pour traiter l'eau, il est besoin de la connaître et donc de pouvoir la caractériser le plus précisément possible. Dans le vocabulaire du traiteur d'eau, certains termes s'écartent sensiblement des termes scientifiques utilisés par ailleurs.
Les paramètres répertoriés ci-dessous sont les plus courants.

. **Turbidité**
En relation avec la mesure des matières en suspension, elle donne une première indication sur la teneur en matières colloïdales d'origine minérale ou organique. Elle est appréciée, soit par rapport à des solutions témoins opalescentes (formazine, mastic...), soit par la mesure de la limite de visibilité d'un objet défini (fil de platine, disque de Secchi).

. **Indice de colmatage:** Fouling index
Il représente le pouvoir colmatant d'une eau. Il est donc aussi en relation avec les matières en suspension et intervient dans les traitements par membranes.

. Matières en suspension (MES)
Le paramètre englobe tous éléments en suspension dans l'eau dont la taille permet leur rétention sur un filtre de porosité donnée.

. Couleur
La couleur vraie après filtration est due, le plus souvent, à la présence de matières organiques dissoutes ou colloïdales. Il n'y a pas de relations entre la couleur et la concentration en matières organiques. Elle est mesurée par comparaison à une solution de référence (Platine - Cobalt).

. Concentration (volumique)
Elle représente le rapport de la masse de corps dissous ou dispersé dans un certain volume d'eau. Elle s'exprime par exemple en $mg.l^{-1}$, $g.m^{-3}$, $g.l^{-1}$...

. Équivalent-gramme
L'équivalent-gramme est le quotient de la masse molaire d'un corps par le nombre de charges de même signe portées par les ions que libère en solution aqueuse une molécule de ce corps.
Ainsi une molécule d'acide orthophosphorique, H_3PO_4 libère trois charges positives et trois charges négatives. Un équivalentgramme de H_3PO_4 est donc égal à 1/3 de la masse d'une mole de H_3PO_4.

. Normalité
Une solution normale est celle qui contient un équivalent-gramme du corps considéré par litre de solution. On utilise

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

aussi des multiples et des sous-multiples de la solution normale (solutions 2 N N/10 -N/25 - N/50 - N/100, etc.).
D'une manière générale, lorsqu'on fait agir sur un volume V_1 d'un électrolyte de normalité N_1, un autre électrolyte de normalité ND le volume V2 est déduit de la relation
$N_1V_1 = N_2V_2$

. Milliéquivalent par litre
On utilise souvent en pratique le milliéquivalent par litre (meq.l^{-1}) qui est la quantité de l'électrolyte considéré dissoute dans un litre de solution égale au millième de l'équivalent-gramme de cet électrolyte. C'est la concentration d'une solution N/1000.

. Degré français
Dans la pratique du traitement de l'eau, on utilise le degré français qui correspond à la concentration d'une solution N/ 5 000.

1 meq.l^{-1} = 5 °F

Exemple: une solution d'un sel de calcium à 2 5 °F contient en calcium Ca (masse molaire 40 g et de valence 2) :

$$\frac{40 \times 5}{2 \times 1\,000} = 0{,}1 \text{ g par litre.}$$

. Correspondance des divers degrés
1° français = 0,56° allemand =
0,7° anglais = 10 ppm CaC03
1° allemand = 1,786° français =
1,25° anglais = 17,86 ppmCaC03
1° anglais = 1,438° français =
0,8° allemand = 14,38 ppm CaC03
1 ppm $CaC0_3$ = 0,1° français = 0,056° allemand = 0,07° anglais.

. Titre hydrotimétrique (TH)
Le titre hydrotimétrique représente la concentration en ions alcalinoterreux présents dans l'eau.

On distingue :
A) TH total: teneur en Ca et Mg.
B) TH calcique: teneur en Ca.
C) Dureté carbonatée: teneur en hydrogénocarbonate et carbonate de Ca et de Mg. Elle est égale au TAC (voir plus bas), si le TH est supérieur au TAC, ou au TH, si le TAC est supérieur au TH.
D) Dureté non carbonatée: (dureté permanente) : indique la teneur en Ca et Mg correspondant à des anions forts. Elle est égale à la différence A - C.

. Titre alcalimétrique (TA) et titre alcalimétrique complet (TAC)
Les valeurs relatives du TA et du TAC permettent de connaître les teneurs en hydroxydes, carbonates ou hydrogénocarbonates alcalins ou alcalinoterreux contenus dans l'eau (voir tableau page 18).
Le TA permet donc de déterminer, en bloc, la teneur en hydroxydes et seulement la moitié de celle en carbonate.
Le TAC assure donc la détermination de la teneur en hydrogéno-carbonates.
Dans certaines eaux très polluées (résiduaires), le TAC recouvre aussi des acides organiques (acétique...).

. Titre en sels d'acides forts - SAF
Dans les eaux naturelles il n'y a pas d'acide fort libre; ne sont présents que des sels de ces acides, surtout sulfates et chlorures. Le SAF exprime la teneur globale en sels de ces acides forts.

. Salinité
La salinité totale d'une eau correspond au total des cations et des anions présents exprimé en mg.l-1.

. Oxydabilité au permanganate
On groupe dans cette expression toutes les substances capables d'être oxydées, par le permanganate de potassium ($KMnO_4$).
Il existe différentes méthodes d'analyses selon la température, le milieu réactionnel et le protocole.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Sels dissous	Valeur du degré en $mg.l^{-1}$	Valeurs respectives des titres TA et TAC				
		si $TA = 0$	si $TA < \frac{TAC}{2}$	si $TA = \frac{TAC}{2}$	si $TA > \frac{TAC}{2}$	si $TA = TAC$
OH^-	3,4	0	0	0	2 TA-TAC	TAC
CaO	5,6					
$Ca(OH)_2$	7,4					
MgO	4,0					
$Mg(OH)_2$	5,8					
$NaOH$	8					
CO_3^{2-}	6	0	2 TA	TAC	2(TAC-TA)	0
$CaCO_3$	10					
$MgCO_3$	8,4					
Na_2CO_3	10,6					
HCO_3^-	12,2	TAC	TAC-2TA	0	0	0
$Ca(HCO_3)_2$	16,2					
$Mg(HCO_3)_2$	14,6					
$NaHCO_3$	16,8					

. Demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO correspond à la consommation globale à chaud de l'oxygène du dichromate de potassium et est représentative de la majeure partie des composés organiques ainsi que des sels minéraux oxydables.

On utilise parfois en France la DCO_{AD} qui correspond à la demande chimique en oxygène de l'échantillon après une décantation de 2 heures.

. Demande biochimique en oxygène (DBO)

C'est la quantité d'oxygène consommée à 20 °C et à l'obscurité pendant un temps donné pour assurer par voie biologique l'oxydation des matières organiques présentes dans l'eau. On utilise conventionnellement la DBO_5, c'est-à-dire la quantité d'oxygène consommé après 5 jours d'incubation. La $DB0_5$ n'est représentative normalement que de la pollution organique carbonée biodégradable.

. Carbone organique total (COT)

Il représente la teneur en carbone lié à la matière organique, et repose sur une mesure de $C0_2$ après oxydation complète.

Cette mesure, rapide et ne nécessitant qu'un volume réduit d'échantillon, est par contre difficilement corrélable avec les

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

mesures précédentes. D'autre part, dans la majorité des cas l'élimination des matières en suspension est nécessaire avant le dosage.

. Azote Kjeldahl (NTK)

Le NTK regroupe l'azote présent sous forme organique et celui sous forme ammoniacal. Il est souvent appelé, à tort, azote total.

. Azote global (NGL)

Le terme couvre l'ensemble des formes azotées présent dans une eau, c'est-à-dire azote organique, azote ammoniacal, nitrite et nitrate. Il correspond donc à l'addition au terme NTK des formes oxydées de l'azote.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2
QUELLES EAUX A TRAITER? POURQUOI?

Figure 6. Chutes d'Iguaçu (Brésil).

1. LES EAUX NATURELLES

Les réserves disponibles d'eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltration, nappes), des eaux de surface retenues ou en écoulement (barrages, lacs, rivières) et des eaux de mer.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.1. LES EAUX SOUTERRAINES

1.1.1. Origine

La porosité et la structure du terrain déterminent le type de nappe et le mode de circulation souterraine.

Une nappe peut être **libre**. Elle est alors alimentée directement par l'infiltration des eaux de ruissellement Le niveau de cette nappe fluctue en fonction de la quantité d'eau retenue.

Une nappe peut être **captive**. Elle est alors séparée de la surface du sol par une couche imperméable. Elle est généralement plus profonde.

Un cas particulier est représenté par les **nappes alluviales**: ce sont les nappes situées dans les terrains alluvionnaires sur lesquels circule un cours d'eau. La qualité de ces eaux est alors directement influencée par la qualité de l'eau de la rivière.

Le stockage et la circulation de l'eau de nappe peuvent se situer dans la totalité de la couche géologique considérée: c'est le cas des terrains poreux tels que sables, grès, alluvions. Ils peuvent s'établir dans des fissures ou fractures de roches compactes. Les roches compactes à fissures étroites sont représentées par la plupart des roches éruptives ou métamorphiques. Ces roches ne sont pas intrinsèquement perméables. L'eau pénètre les roches et y circule grâce aux fissures localisées et dispersées.

Les roches compactes à fissures larges ou à cavernes sont typiquement représentées par les terrains calcaires: les fissures originelles sont progressivement élargies par dissolution dans l'eau chargée de gaz carbonique qui y circule; on aboutit à des cavernes importantes, avec parfois formation de vrais cours d'eau souterrains; c'est le relief **karstique**. On peut aussi trouver rarement des marnes et exceptionnellement du grès.

1.1.2. Caractéristiques générales

La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la **composition chimique** de l'eau retenue. A tout instant, l'eau est en contact avec le sol dans lequel elle stagne ou circule: il s'établit un équilibre entre la composition du terrain et celle de l'eau. Les eaux circulant dans un sous-sol sablonneux ou granitique sont acides et peu minéralisées. Les eaux circulant dans des sols calcaires sont bicarbonatées calciques.

Le tableau 1 donne les caractéristiques des eaux souterraines selon les principaux paramètres analytiques.

Parmi les caractéristiques de ces eaux, il faut retenir une faible turbidité, une température et une composition chimique constantes, l'absence presque générale d'oxygène. Dans le cas des nappes en milieu fermé, principalement en circulation de type karstique, on peut cependant relever des variations brutales dans la composition de l'eau, avec apparition de turbidité et de pollution diverses. Ces variations sont liées à celles du débit de la nappe engendrées par les précipitations. En outre, les eaux souterraines sont souvent d'une grande pureté bactériologique.

1.1.3. Potabilité

Les eaux souterraines ont, pendant longtemps, été synonymes "d'eaux propres" et répondant naturellement aux

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

normes de potabilité. Ces eaux sont en effet moins sensibles aux pollutions accidentelles.

Une nappe libre, étant alimentée par toute la surface du sol située au-dessus d'elle, est plus sensible qu'une nappe captive. Les nappes alluviales sont aussi menacées sur toute leur surface et par l'ensemble des affluents de la rivière.

Lorsqu'une nappe souterraine a été polluée, il est très difficile de récupérer sa pureté originelle: les polluants ayant contaminé la nappe sont en effet non seulement présents dans l'eau, mais également fixés et adsorbés sur les roches et minéraux du sous-sol.

Les eaux souterraines peuvent aussi contenir des éléments à des concentrations dépassant largement les normes de potabilité. Ceci est dû à la composition du terrain de stockage. On peut citer Fe, Mn, H_2S, F...

Les eaux souterraines doivent être traitées avant distribution toutes les fois que la concentration d'un ou plusieurs éléments dépasse la valeur autorisée par les règlements en vigueur.

1.1.4. Eaux minérales et eaux de source

La Législation française définit des **"eaux minérales"** et des **"eaux desource".**

Les eaux minérales sont des eaux profondes qui peuvent contenir certains éléments en concentration supérieure à la concentration autorisée pour les eaux potables et qui sont douées de propriétés thérapeutiques reconnues. Elles sont distribuées en bouteille, avec parfois certains traitements bien définis comme décantation naturelle, déferrisation par simple aération, élimination et/ou réin-corporation du $C0_2$ originel.

Les eaux de source sont des eaux qui,contrairement aux eaux minérales, doivent répondre, à l'émergence, aux critères de potabilité, et ne peuvent subir aucun traitement.

A ces deux types d'eaux, on peut opposer le terme **"eaux de table"** qui correspond à des eaux embouteillées dont le seul critère est de répondre aux normes de potabilité, tout traitement préalable étant autorisé.

1.2. LES EAUX DE SURFACE

Ce terme englobe toutes les eaux circulant ou stockées à la surface des continents.

1.2.1. Origine

Elles ont pour origine, soit des nappes profondes dont l'émergence constitue une source de ruisseau, de rivière, soit les eaux de ruissellement. Ces eaux se rassemblent en cours d'eau, caractérisés par une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement et une vitesse de circulation appréciable. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (lacs) ou artificielles (retenues, barrages) caractérisées par une surface d'échange eau atmosphère quasiment immobile, une profondeur qui peut être importante et un temps de séjour appréciable.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 1. Principales différences entre eaux de surface et eaux souterraines.

Caractéristique	**Eaux de surface**	**Eaux souterraines**
Température	variable suivant saisons	relativement constante
Turbidité, MES (vraies ou colloïdales)	variable, parfois élevée	faible ou nulle (sauf en terrain karstique)
Couleur	liée surtout aux MES (argiles, algues...) sauf dans les eaux très douces et acides (acides humiques)	liée surtout aux matières en solution (acides humiques par exemple)
Minéralisation globale	variable en fonction des terrains, des précipitations, des rejets...	sensiblement constante en général nettement plus élevée que dans les eaux de surface de la même région
Fe et Mn divalents (à l'état dissous)	généralement absents, sauf en profondeur des pièces d'eau en état d'eutrophisation	généralement présents
CO_2 agressif	généralement absent	souvent présent en grande quantité
O_2 dissous	le plus souvent au voisinage de la saturation. Absent dans le cas d'eaux très polluées	absent la plupart du temps
H_2S	généralement absent	souvent présent
NH_4	présent seulement dans les eaux polluées	présent fréquemment sans être un indice systématique de pollution bactérienne
Nitrates	peu abondants en général	teneur parfois élevée
Silice	teneur en général modérée	teneur souvent élevée
Micropolluants minéraux et organiques	présents dans les eaux de pays développés, mais susceptibles de disparaître rapidement après suppression de la source	généralement absents, mais une pollution accidentelle subsiste beaucoup plus longtemps
Éléments vivants	bactéries (dont certaines pathogènes), virus, plancton (animal et végétal)	ferrobactéries fréquentes
Solvants chlorés	rarement présents	souvent présents
Caractère eutrophe	fréquent Accentué par les températures élevées	non

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.2. Caractéristiques générales

La **composition chimique** des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble des bassins versants. Au cours de son cheminement, l'eau dissout les différents éléments constitutifs des terrains. Par échange à la surface eauatmosphère, ces eaux se chargent en gaz dissous (oxygène, azote, gaz carbonique).

Le tableau 1 donne les éléments caractéristiques des eaux de surface par rapport aux eaux souterraines. Il faut noter

- présence quasi-générale de gaz dissous, en particulier l'oxygène,

- concentration importante en **matières en suspension**, tout au moins pour les eaux courantes. Ces matières en suspension sont très diverses, allant des particules colloïdales aux éléments figurés entraînés par les rivières en cas d'augmentation importante du débit Dans le cas des eaux de barrage, le temps de séjour provoque une décantation naturelle des éléments les plus grossiers: la turbidité résiduelle est alors colloïdale,

- présence de **matières organiques** d'origine naturelle provenant de la décomposition des organismes végétaux ou animaux vivant à la surface du bassin versant ou dans la rivière et qui se décomposent après leur mort (végétaux, animaux...),

- présence de **plancton**: les eaux de surface sont le siège d'un développement important de phytoplancton (algues...) et de zooplancton. Dans certaines conditions, une vie aquatique intense peut se développer: développement de végétaux macrophytes, de poissons,

- **variations journalières** (différence de température, d'ensoleillement) ou saisonnières: variations climatiques (température, fonte des neiges), de végétation (chute des feuilles). Elles peuvent être aléatoires: pluies soudaines, orages, pollutions accidentelles. Dans les retenues d'eau de surface, la qualité de l'eau varie de la surface de l'eau jusqu'au fond de la retenue (O_2, Fe, Mn, oxydabilité, plancton). Le profil de chacun de ces paramètres varie lui-même en fonction des périodes de l'année,

- pollution organique conduisant souvent à l'eutrophisation des eaux (cf. page 30).

1.2.3. Potabilité des eaux de surface

La eaux de surface sont rarement potables sans aucun traitement. Outre les éléments signalés en 1.2.2., les eaux de surface sont généralement polluées bactériologiquement. De plus, elles peuvent présenter plusieurs pollutions

- d'origine urbaine: les rejets provenant de la collecte des ERU (métabolisme de l'homme, confort domestique), après leur traitement en station d'épuration,

- d'origine industrielle: polluants et micropolluants organiques (hydrocarbures, solvants, produits de synthèse, phénols) ou inorganiques (métaux lourds, ammoniaque, produits toxiques),

- d'origine agricole: engrais et produits pesticides ou herbicides entraînés par les eaux de pluie et le ruissellement. Également rejets organiques dus à la présence d'élevages importants.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.3.
EAUX DE MER
ET EAUX SAUMATRES

Le tableau 2 donne la composition d'une eau de mer "standard" (type ASTM). Ces eaux sont caractérisées par une **salinité** importante, qui peut varier selon les origines

origine	salinité $g.l^{-1}$
Mer Baltique	17
Atlantique et Pacifique	3 2 à 3 5
Mer Méditerranée	38 à 40
Mer Rouge	43 à 45
Mer Morte	270

Certaines **caractéristiques physiques** de l'eau de mer sont particulièrement importantes: turbidité, matières en suspension, nombre de particules (de plus de 2 ou 5 µm par ml ou 100 ml), indice de colmatage. Elles sont très **variables** selon la localisation

- en pleine mer, les MES sont représentées essentiellement par le zooplancton et le phytoplancton, dont la valeur est de quelque $mg.l^{-1}$,

- près des rivages: la teneur en sable peut être importante selon l'agitation (vent, marées) et la profondeur (présence d'un plateau continental). De plus, à proximité des agglomérations, la pollution par des rejets urbains et industriels peut devenir prépondérante: la teneur en MES peut varier de plusieurs dizaines de $mg.l^{-1}$ à une ou deux centaines,

Tableau 2. Analyse standard d'eau de mer - pH = 8,2 - 8,3.

	°F		°F
Dureté totale (TH)……..	650	Alcalinité libre ……......	0
Dureté carbonatée…….	15	Titre alcalimétrique (TA)……...	0
Dureté permanente……..	635	Titre alcalimétrique complet (TAC)……	15
Dureté calcique (TCa)……	110	Sels d'acides forts (SAF)……	3 085
Dureté magnésienne (TMg)……...	540	Salinité totale . . …….......	3100

Anions	**$mg.l^{-1}$**	**$méq.l^{-1}$**	**Cations**	**$mg.l^{-1}$**	**$méq.l^{-1}$**
chlorure Cl^-	19 880	560	calcium Ca^{2+}	440	22
sulfate $S0_4^{2-}$	2 740	57	magnésium Mg^{2+}	1315	108
nitrate $N0_3^-$	-	-	sodium Na^+	11040	480
bicarbonate $HC0_3^-$	183	3	potassium k^+	390	10
bromure Br^-	68	0,9	strontium	1,3	0,3
	22 871	620,9		13186,3	620,3
Salinité totale: 36,4 $g.l^{-1}$					

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- dans les estuaires, la rencontre du courant fluvial avec l'eau de mer et l'influence de la marée (avec remontée de l'eau de mer dans le lit du fleuve et présence d'un mascaret) sont la cause de variations importantes de la salinité et de la teneur en MES de l'eau prélevée en un point donné. L'agitation provoquée par l'inversion du courant remet en suspension des sédiments, avec formation d'un "bouchon" dont la teneur en MES peut atteindre plusieurs $g.l^{-1}$,

la teneur en plancton peut également être très variable selon les conditions géographiques (mer peu profonde et peu agitée) et climatiques (floraison d'algues en mer du Nord par exemple).

1.4. CYCLE DE L'AZOTE

Le cycle de l'azote est schématisé sur la figure 7.

Dans un milieu aérobie, matières organiques azotées et sels ammoniacaux se transforment en nitrites puis en nitrates en consommant de l'oxygène. C'est la **nitrification** qui recouvre deux réactions successives:

- la **nitritation,** due à l'action de bactéries nitreuses: Nitrosomonas, Nitrosocystis, Nitrosospira, Nitrosoglea...,
- la **nitratation,** ceuvre des bactéries des genres: Nitrobacter, Nitrocystis, Bactoderma, Macroderma...

Toutes ces bactéries sont autotrophes et aérobies strictes. Elles utilisent l'énergie produite par l'oxydation de l'ammoniaque et des nitrites pour réduire le carbone minéral provenant soit du gaz carbonique, soit des carbonates.

Pour que la réaction soit complète, il faudrait 4,6 mg d'oxygène par mg d'azote à oxyder selon la réaction simplifiée

$$NH_3 + 2\,O_2 \rightarrow HNO_3 + H_2O$$

En réalité l'oxydation de tout l'azote ammoniacal ne va pas jusqu'au stade nitrate (formation de composés intermédiaires constituant la masse bactérienne), et en pratique, il suffit de 4,2 mg d'oxygène par mg d'azote à oxyder.

La nitrification tend à appauvrir les cours d'eau en oxygène, tout comme l'assimilation de la pollution organique.

Figure 7. Cycle de l'azote.

Ces nitrates constituent une réserve d'oxygène qu'ils peuvent recéder par dénitrification lorsque les conditions redeviennent réductrices et anaérobies, mais ces conditions ne sont pas celles que l'on doit espérer pour une rivière.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.5. BACTÉRIES INTERVENANT DANS LE CYCLE DU SOUFRE

Le cycle du soufre est schématisé par lafigure 8. La fermentation sulfhydrique, anaérobie, transforme les composés organiques soufrés en H_2S.

D'autres bactéries, aérobies, sont capables d'oxyder H_2S pour former du soufre(qu'elles peuvent parfois stocker sous forme de granules réfringents disséminés dans leur cytoplasme) puis éventuellement de l'acide sulfurique :

•. réactions simples **d'oxydo-réduction** chez:

- les **leucothiobactériales** (ou bactéries sulfuraires incolores), comme Beggiatoa ou Thiothrix

$$2H_2S+O_2 \rightarrow 2H_20+2S$$

- certaines **Protobactériacées**, comme Thiobacillus thiooxydans qui oxyde ensuite le soufre en acide sulfurique

$$2S+3O_2 +2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4$$

En milieu aérobie, le terme final peut donc être l'apparition de sulfates; par contre, en milieu anaérobie, ceux-ci peuvent être réduits par d'autres bactéries (Desulfovibrio desulfuricans, certains Clostridium...) qui sécrètent des sulfato-réductases capables de catalyser la réaction globale

$$H_2SO_4 + 4\,H_2 \rightarrow H_2S + 4\,H_2O$$

Il existe aussi des bactéries sulfitoréductrices (certaines espèces de Clostridium et Welchia).

Certaines de ces bactéries interviennent dans les phénomènes de corrosion des canalisations en fonte ou acier ou en béton (voir page 419).

- réactions **photosynthétiques** chez les **Rhodothiobactériales** (ou bactéries sulfuraires pourpres) comme Chromatium, Thiospirillum (voir figure 9) ou Thiopedia, de même que chez les **Chlorothiobactériales** (ou bactéries sulfuraires vertes)

Figure 8. Cycle du soufre.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

comme Chlorobium ou Chlorobacterium ; il y a d'abord formation de soufre élémentaire

$$2\,H_2S + CO_2 \xrightarrow[\text{lumineuse}]{\text{énergie}} (CH_2O)^* + H_2O + 2\,S$$

Le soufre produit est soit stocké dans la cellule bactérienne, soit excrété, suivant les espèces. Ultérieurement, il peut être transformé en acide sulfurique :

$$2\,S + 3\,CO_2 + 5\,H_2O \xrightarrow[\text{lumineuse}]{\text{énergie}} 3\,(CH_2O) + 2\,H_2SO_4$$

La réaction globale peut alors s'écrire

$$H_2S + 2\,CO_2 + 2\,H_2O \xrightarrow[\text{lumineuse}]{\text{énergie}} 2\,(CH_2O) + H_2SO_4$$

* Dans ces réactions (CH2O) symbolise la matière organique synthétisée.

Figure 9. Thiospirillum x 1000.

.

1.6. OXYDORÉDUCTION BACTÉRIENNE DU FER ET DU MANGANÈSE

- **Fer**

L'oxydation du fer, exothermique, peut être catalysée par certaines bactéries grâce aux enzymes d'oxydo-réduction qu'elles excrètent (flavines): le fer trivalent insolubilisé sous forme d'hydroxyde est ensuite stocké dans les sécrétions mucilagineuses (gaines, pédoncules, capsules, etc.) de ces bactéries. Les organismes responsables de ces phénomènes sont surtout des Sidérobactériales, notamment :

- Chlamydobactériacées : Leptothrix (L.ochracea, L.crassa, L.discophora),
- Crenothricacées : Crenothrix (Cr.polyspora), Clonothrix (Cl.ferruginea, Cl.fusca),
- Siderocapsacées : Siderocapsa, Ferrobacillus, Sideromonas,
- Gallionellacées : Gallionella (G.fenuginea, G.major).

Des Protobacténacées (Thiobacillus ferro-oxydans) peuvent aussi présenter cette propriété.

- **Manganèse**

Tous ces organismes peuvent également provoquer l'oxydation du manganèse, si ce dernier élément est nettement plus abondant que le fer; en outre, d'autres bactéries présentent à cet égard une action spécifique, par exemple :

- bactéries vraies: Pseudomonas (Ps.manganoxydans), Metallogenium (M.personatum, M, symbioticum),
- Siderobactériales : Leptothrix (L. echinata, L. lopholes),
- Hyphomicrobiales : Hyphomicrobium (H.vulgare).

L'action de tous ces micro-organismes est parfois très importante dans les traitements de déferrisation-démanganisation.

Certaines de ces bactéries, placées en condition réductrice, peuvent utiliser pour leur métabolisme le Mn qu'elles ont stocké dans leur gaine, qui est alors solubilisé et relargué sous forme Mn^{++}.

- . **Corrosion bactérienne**

Les phénomènes décrits au paragraphe eaux profondes, mais ils peuvent, par contre, être néfastes à l'intérieur d'un tuyau en fonte ou en acier.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Des traces de fer dans l'eau peuvent suffire à provoquer le développement des ferrobactéries citées plus haut. Trois genres principaux sont aisément reconnaissables à l'observation microscopique

- **Leptothrix** : filament (ou trichome) contenant une file unique de cellules cylindriques et entouré d'une gaine; celle-ci est d'abord mince et incolore, puis elle s'épaissit et prend une couleur brune de plus en plus accentuée à mesure qu'elle s'imprègne de fer oxydé (figure 10),

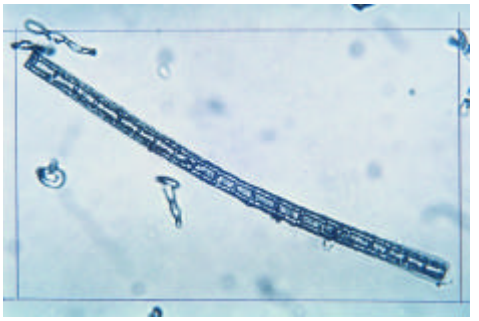


Figure 10. Leptothrix ochracea X 680.

- **Crenothrix** : les trichomes sont évasés à une extrémité, par laquelle les cellules s'échappent sur plusieurs rangs pour aller former de nouveaux trichomes. Même évolution de la gaine que pour Leptothrix,

- **Gallionella** : cellules isolées, attachées en principe à un pédoncule spiralé (ramifié ou non) qu'elles ont sécrété. En fait, la liaison est fragile et il est fréquent de ne retrouver que le pédoncule (figure 11).

Figure 11. Gallionella ferruginea X 680.

L'activité de ces bactéries aboutit à la formation de tubercules (dont l'origine peut être révélée par dissolution partielle dans un acide fort et observation du résidu au microscope) pouvant obstruer la conduite. Ces tubercules recouvrent des zones qui deviennent anaérobies et où se développent alors des bactéries réductrices des sulfates (Desulfovibrio desulfuricans). Ces proliférations bactériennes favorisent la corrosion.

1.7. EUTROPHISATION

Ce terme caractérise un phénomène d'évolution de la qualité des eaux de lacs ou de retenues artificielles. Il est souvent étendu aux eaux de rivières.

1.7.1. Eutrophisation des *lacs*

L'évolution des eaux de lacs peut se résumer de la façon suivante - un lac jeune et profond est **oligotrophe** les eaux y sont bleues et transparentes; l'oxygène dissous est présent jusqu'au fond; la biomasse est peu abondante,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- au cours de son vieillissement, le lac s'enrichit en matières organiques, à cause de sa production primaire photosynthétique (algues) et des apports extérieurs; il devient alors successivement **mésotrophe puis eutrophe;** on y constate les phénomènes suivants: diminution de la profondeur par comblement progressif, coloration des eaux (vert à brun), transparence réduite, déficit en oxygène dans les couches profondes, biomasse plus importante, apparition d'espèces indicatrices de l'eutrophisation (en particulier de Cyanophycées ou algues bleues dont la plus connue est Oscillatoria rubescens). Le terme final est l'étang, le marécage, etc.

Le passage d'un type au suivant demande un temps très long, qu'on peut estimer en milliers d'années. Mais ce processus naturel a été accéléré au point de devenir, dans certains cas, perceptible à l'échelle d'une vie humaine. Cette situation est le résultat des activités humaines riveraines, qui apportent aux eaux stagnantes de la matière organique et des éléments fertilisants (azote et phosphore en particulier) : agriculture, effluents urbains ou industriels.

Les conséquences de cette eutrophisation artificielle peuvent être désastreuses pour le tourisme et la pêche; d'autre part, le coût du traitement de l'eau s'en trouve considérablement augmenté, du fait des équipements et des réactifs nécessaires pour éliminer les organismes eux-mêmes ou les produits de leur métabolisme.

On peut lutter contre l'eutrophisation

- par des mesures curatives (oxygénation, déstratification, lutte chimique ou biologique),
- par des mesures préventives: détournement des effluents par un collecteur de ceinture (ex.: lac d'Annecy) ou par une dérivation; traitement tertiaire dans les stations d'épuration (diminution de MES, phosphore, azote).

1.7.2. Cas des rivières indices biotiques

Le problème ne se pose pas de la même façon dans les eaux courantes, auxquelles la définition complète de l'eutrophisation ne peut pas s'appliquer. Pour caractériser la pollution des rivières, on a longemps utilisé les degrés de **saprobité**, liés aux caractéristiques chimiques de l'eau et à des zones biologiques définies par les représentants des diverses communautés animales et végétales (système de Kolkwitz et Marson, 1909).

En France, on utilise plutôt les **indices biotiques** de Verneaux et Tuffery (1967), inspirés de la méthode mise au point en Grande-Bretagne par la Trent River Authority : analyse des peuplements de macro-invertébrés benthiques (mollusques, crustacés, vers, larves d'insectes), d'où l'on déduit un indice biotique de qualité croissante de la rivière compris entre 0 et 10.

Les modifications de biocénose sont particulièrement nettes en aval d'un rejet polluant (changement de nature du groupe zoologique dominant, diminution du nombre des espèces, augmentation du nombre d'individus dans chaque espèce); dans la méthode qui vient d'être citée, une pollution organique ponctuelle se traduit immédiatement en aval par une chute brutale de l'indice biotique, qui augmente plus loin en fonction de l'auto- épuration. De telles méthodes apportent de précieux renseignements pour étudier les pollutions, juger de l'efficacité d'un traitement d'effluent, etc.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.8. RADIOACTIVITÉ

1.8.1. Radioactivité naturelle

Les radionucléides émis par les rayonnements cosmique et tellurique et les radio-éléments présents dans les organismes vivants constituent les sources naturelles de radioactivité. Dans les eaux, cette radioactivité est due à des éléments dissous à partir de ces sources naturelles, et à des éléments isolés tels que le potassium 40.

- **Eaux souterraines**

La radioactivité des eaux souterraines est essentiellement due à l'émanation du radium qui est présent dans toutes les roches. Le radium est peu soluble, mais son descendant le radon 222 est très soluble.

La présence d'autres radioéléments tels que l'uranium, le thorium, le plomb et le polonium est associée aux roches granitiques, aux dépôts d'uranium, de lignite, de phosphate. Les formes prédominantes sont constituées par l'uranium 238 présent à plus de 99 % dans les dépôts et de son descendant l'uranium 234 (teneur la plus forte en uranium des eaux minérales: 79 $\mu g.l^{-1}$.

- **Eaux de surface**

Les radio-éléments émis dans l'atmosphère se fixent sur les aérosols et sont entraînés par les eaux de pluie: ^{3}H et ^{222}Ra essentiellement, argon, beryllium, phosphore.

La solubilisation des radioéléments du sol se traduit là encore par la présence du radon, de l'uranium... La radioactivité naturelle des eaux de surface est généralement très faible et ce sont les activités humaines qui sont responsables de la radioactivité de ces eaux.

- **Mines d'uranium**

En aval des sites, les taux de radioactivité sont élevés indépendamment de toute exploitation. Dans les régions concernées, la consommation d'eau à partir de puits individuels est très courante, alors qu'elle devrait passer obligatoirement par une station de traitement. La contamination des eaux de surface se traduit par une augmentation de la minéralisation et des MES; la radioactivité se trouve souvent multipliée d'un facteur 4 voire 5. Pour les eaux potables, le problème essentiel est posé par le radon qui est facilement transporté jusqu'au robinet car il est soluble dans l'eau froide sous pression.

1.8.2. Radioactivité artificielle

La plupart des émetteurs ß (excepté le radon 228) sont associés à des activités humaines.

- **Radio-éléments** présents dans l'environnement

- Centrales PWR: ^{58}Co, ^{60}Co, ^{54}Mn, ^{3}H
- Centrales et tirs atomiques
^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{3}H, ^{106}Ru, ^{131}I
- Hôpitaux: ^{131}I
- Exploitation des mines d'uranium:
^{230}Th, ^{226}Ra (émetteurs a)
^{228}Ra, ^{210}Pb (émetteurs ß)

La contamination des eaux de surface peut donc se faire par diverses voies: dilution des retombées atmosphériques, lessivage des terrains par les eaux et nuisances industrielles. Tous les rejets liquides résultant d'une activité industrielle sont interdits dans les nappes et se font dans les cours d'eau et les mers.

Les éléments solubilisés peuvent subir une première adsorption naturelle sur les boues argileuses des eaux turbides.

Les rejets autorisés des centrales nucléaires sont proportionnels aux puis

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sances installées et se réfèrent uniquement aux débits minimaux et maximaux du cours d'eau récepteur. Les valeurs fixées sont des moyennes quotidiennes et la limite d'activité volumique ajoutée peut, en France, sur autorisation, atteindre, pendant une période cumulée de 30 jours, un maximum de 10 fois la moyenne annuelle autorisée.

- **Tritium $^3H^+$** (T)

C'est un des radioéléments auquel il conviendra d'accorder une attention toute particulière bien que les émissions de tritium $^3H^+$, à niveau d'activité identique, représentent un danger très inférieur à celui des éléments précédents.

Le tritium est produit naturellement dans l'atmosphère mais c'est aussi le Radioélément dont la quantité rejetée dans l'environnement (Centrales - explosions nucléaires) est la plus importante.

Origines :

eaux à la surface des océans 3 n Ci.m^{-3}

précipitations 4 n Ci.m^{-3}

eaux continentales 6 à 24 n Ci.m^{-3}

Rejets: 4 M Ci par an dans le monde

Prévisions pour l'an 2000 : 30 M Ci par an.

99 % du tritium se trouvent à l'état d'eau tritiée ("THO"): le $^3H^+$ gazeux se transforme par oxydation sous forme liquide ou vapeur. L'eau tritiée diffuse dans le sol (vapeur), s'incorpore très facilement dans les fluides biologiques, l'organisme entier et, au contraire des autres radioéléments, ne se fixe pas sur les sédiments ou les MES.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. LES EAUX DE CONSOMMATION

2.1. QUANTITÉS NÉCESSAIRES

On admet que l'homme consomme, en moyenne, 2 litres d'eau par jour pour la boisson et la cuisson des aliments. Cette quantité dépend des conditions climatiques et peut aller jusqu'à 3 ou 4 litres en pays chaud, mais reste faible par rapport à la consommation domestique de l'eau. Celle-ci peut varier de quelques litres par jour dans les pays sans adduction publique et à faible confort ménager, jusqu'à plusieurs centaines de litres dans les pays très développés.

Habitat	**Distribution**	**Quantité d'eau distribuée***	
		Fourchette	Moyenne
Urbain	intérieur des logements	70 – 250	140
	bornes-fontaines	25 - 70	40
Rural	intérieur des logements ou bornes-fontaines	25 - 70	40

* en litres par jour et par consommateur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

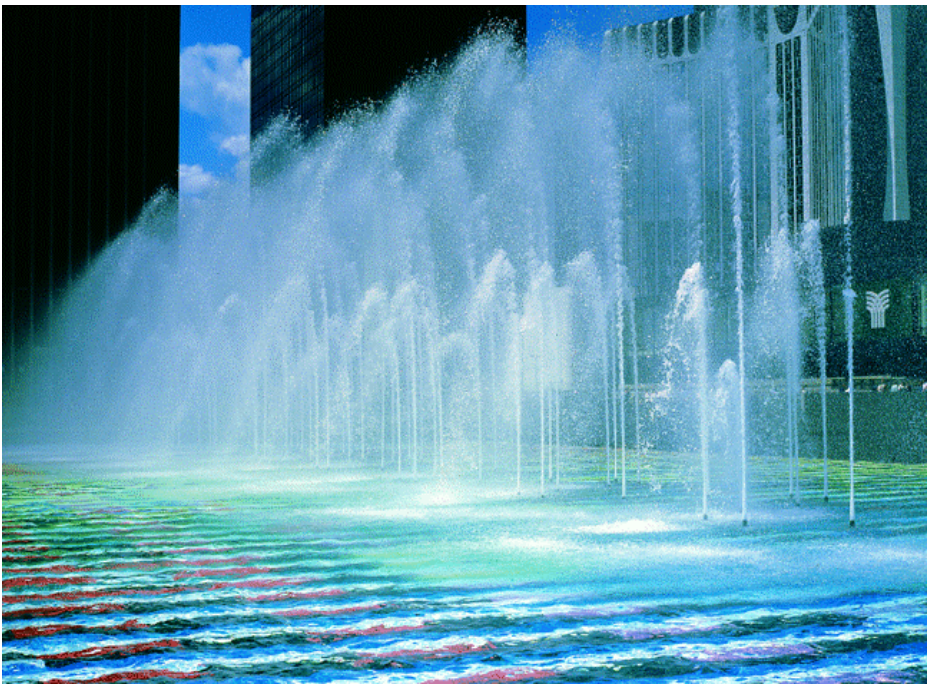


Figure 12. Fontaines de La Défense (Paris).

A ces besoins, il faut ajouter l'eau consommée par le secteur tertiaire (bureaux, commerces), et les différents services publics (écoles, hôpitaux, piscines, lavage des rues) qui consomment en quantité importante de l'eau distribuée. En outre, certaines industries utilisent également de l'eau distribuée.

Enfin, la demande en eau doit également tenir compte de l'état du réseau et des pertes relevées dans le réseau. On définit un rendement du réseau, qui est le rapport volume d'eau compté chez les abonnés par volume d'eau au départ de l'usine. Un bon réseau doit permettre d'obtenir un rendement de 80%. En France, le rendement est inférieur à 70% pour 50% des réseaux; il est inférieur à 60% pour 25% des réseaux (source Mémento Lyonnaise des Eaux).

Le tableau ci-dessous montre la variabilité de la demande en eau pour différentes conditions d'habitation.
(D'après Mémento Lyonnaise des Eaux)

Habitat	**Quantité en m^3** par habitant et par an
Population rurale	12 à 50
Maison individuelle	110
Immeubles collectifs:	
- H.L.M.	60
- Grand luxe	200
Bureaux	2 5
Paris	15 0
Lyon	140
New-York	500

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2. POURQUOI TRAITER?

Dans tous les cas, l'eau mise à disposition du consommateur dans le réseau de distribution doit être traitée, même si l'homme n'en consomme directement qu'une très faible proportion. Il est en effet dangereux pour la santé et économiquement prohibitif d'envisager un double réseau de distribution, l'un des réseaux distribuant l'eau destinée à la consommation et l'autre réseau distribuant l'eau destinée aux autres usages.

Quel que soit l'usage qu'en fera le consommateur, l'eau arrivant au robinet de ce consommateur doit donc être "potable", c'est-à-dire répondre à la réglementation en vigueur (voir page 575).

Il est nécessaire de traiter l'eau chaque fois que l'un des paramètres analytiques est supérieur aux normes en vigueur dans le pays considéré. L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) établit pour chaque paramètre, des recommandations qui doivent être adaptées dans chaque pays, en fonction de l'état sanitaire et des considérations économiques de ce pays, pour aboutir aux normes réglementaires nationales

.

2.3. CRITÈRES DE CHOIX

Le choix de l'eau à traiter avant distribution dépend de plusieurs facteurs. Pour chacune des ressources dont on dispose (eau souterraine, eau de surface courante ou stockée), on évalue :

- **la quantité:** la "source" doit être capable de fournir, en toute circonstance, la quantité d'eau nécessaire. Dans les pays à précipitations très variables, il peut être nécessaire de prévoir un barrage pour retenir pendant les périodes de pluies la quantité dont on aura besoin en période sèche,

- **la qualité:** la qualité de l'eau brute dont on dispose doit être compatible avec la législation en vigueur dans certains pays. Il faut déterminer le procédé de traitement le mieux adapté pour potabiliser cette eau. Ce procédé doit être évalué en tenant compte de la variabilité de la qualité de l'eau au cours des années précédentes (variations journalières, saisonnières, climatiques) et des variations potentielles que l'on peut supposer pour le futur (construction d'un barrage par exemple).

Il faut, en outre, se rappeler que, eau souterraine n'est pas synonyme d'eau pure de nombreuses nappes sont en effet polluées soit bactériologiquement, soit par des nitrates, des produits phytosanitaires, des solvants chlorés ou des hydrocarbures.

- **l'économie:** il faut ensuite comparer les coûts d'investissement et de fonction nement relatifs à chacune des ressources disponibles, pour assurer à la fois la quantité et la qualité de l'eau à distribuer stockage et transport de l'eau brute, traitement de l'eau, stockage et transport de l'eau traitée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.4 IMPURETÉS DE NATURE BIOLOGIQUE

Toutes les eaux sont susceptibles d'être polluées par des micro-organismes.

2.4.1. Bactéries et virus

Les **bactéries test** de contamination fécale sont apportées parles rejets d'eaux résiduaires urbaines effectués dans l'environnement, que ce soit avec ou sans traitement. Ces bactéries sont le révélateur d'une contamination possible par des bactéries ou virus, pathogènes pour l'homme (voir page 396).

Le développement de **germes banals** peut créer de graves problèmes dans les réseaux de distribution: consommation de l'oxygène dissous, corrosion, apparition de mauvais goûts.

2.4.2. Micro-organismes divers phytoplancton et zooplancton

Les eaux de surface contiennent de nombreux organismes constituant le phytoplancton et le zooplancton. Plusieurs de ces organismes, dont certains Actinomycètes et certaines Cyanophycées, sécrètent des composés (comme la géosmine) donnant à l'eau un goût et une odeur désagréable. D'autres sont pathogènes pour l'homme (amibes).

La présence d'algues et de macro-organismes dans le réseau (Asellus, Copépodes, Nématodes) est désagréable pour le consommateur, et leur développement peut aboutir à des désordres importants (prolifération, dépôts, apparition de conditions anaérobies).

De plus, pendant leur développement ou au moment de leur mort, certains micro-organismes (Cyanophycées par exemple) émettent des métabolites toxiques pour les animaux supérieurs.

2.5. IMPURETÉS MINÉRALES

Certaines de ces impuretés ont une influence sur les qualités organoleptiques de l'eau, son aspect esthétique, ou son comportement dans le réseau de distribution, mais sont sans effet appréciable sur la santé du consommateur, alors que d'autres ont un effet reconnu.

2.5.1. Impuretés sans effet appréciable sur la santé

- **La turbidité**

C'est, avec la couleur, le premier paramètre perçu directement par le consommateur. Toutes les eaux sont turbides, mais une turbidité trop importante provoque un rejet de la part de l'utilisateur. La turbidité doit aussi être éliminée pour d'autres raisons

- permettre une bonne désinfection de l'eau,
- éliminer tout polluant adsorbé sur les matières en suspension (métaux lourds...),
- éviter tout dépôt dans le réseau de distribution.

- **La couleur**

La couleur peut être due à certaines impuretés minérales (fer...) mais également à certaines matières organiques (acides humiques, fulviques). Elle doit être éliminée pour rendre l'eau agréable

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

à boire. L'élimination de la couleur s'accompagne également de l'élimination de certaines matières organiques indésirables (précurseurs de composés haloformes...).

. La minéralisation

L'alcalinité et la dureté participent à l'équilibre calcocarbonique de l'eau conjointement avec le pH et l'acide carbonique dissous (voir page 262). On cherche à distribuer une eau à l'équilibre pour éviter l'entartrage ou la corrosion des réseaux. Une quantité trop importante de sulfates a un effet sur le goût de l'eau et peut la rendre laxative. Une quantité trop importante de chlorures affecte aussi le goût de l'eau et la rend corrosive.

. Certains métaux

Le fer et le manganèse peuvent provoquer une coloration et sont à l'origine de dépôts dans les réseaux. Des corrosions peuvent en résulter. Par ailleurs, ils affectent les qualités organoleptiques de l'eau, comme d'autres métaux: le cuivre, l'aluminium, le zinc.

. Les gaz dissous

L'H_2S est révélateur de conditions anaérobies, et d'un potentiel d'oxydo-réduction trop bas; il provoque de mauvaises odeurs et peut être à l'origine de corrosion. Il doit être éliminé.

. L'ammonium NH^{4+}

Il n'a pas d'effet appréciable sur la santé du consommateur, mais sa présence dans les eaux est un indicateur de pollution. Dans les eaux profondes, la présence de NH, peut également être due aux conditions réductrices régnant dans une nappe. L'ammonium doit être éliminé dans les eaux de consommation, car c'est un aliment qui peut permettre à certaines bactéries de proliférer dans les réseaux de distribution.

2.5.2. Impuretés affectant la santé

2.5.2.1. Moyens d'étude

Il est difficile d'étudier l'influence d'un produit donné directement sur l'homme. On peut contrôler des accidents dus à la toxicité aiguë de certains produits provoquant la mort (= empoisonnement). On peut également réaliser des études épidémiologiques, dont le but recherché est de corréler l'ingestion de certains produits avec une mortalité, un risque de cancer ou de maladie donnée.

Cependant, étant donné le nombre de facteurs pouvant intervenir dans l'environnement de chaque individu, et la mobilité des populations dans la vie moderne, les études épidémiologiques sont longues, coûteuses, et le résultat en est discutable. Il est donc préférable d'utiliser des moyens expérimentaux. Pour améliorer la connais sance de l'effet de polluants divers sur la santé des consommateurs, les études et expériences ne sont pas faites directement sur l'homme mais sur certains animaux dont la sensibilité a été reconnue proche de celle de l'homme. Les résultats obtenus sont ensuite extrapolés à l'homme au moyen de modèles reproduisant au mieux le passage de l'animal à l'homme.

Les effets observés sur différents animaux peuvent se caractériser de plusieurs manières :

- **toxicité aiguë**: le produit provoque rapidement la mort de l'animal. La DL 50 exprime la dose létale qui provoquera la mort de 50% des individus en un temps donné (24 heures par exemple),
- **toxicité chronique:** c'est la dose dont l'ingestion répétée journellement provoque la mort prématurée des individus. Le métabolisme d'un individu est capable de supporter sans risques une dose maximale

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ingérée chaque jour tout au long d'une vie: c'est l'ADI (Acceptable Daily Intake),

- **cytotoxicité** : les études de toxicité peuvent se faire en utilisant des cultures cellulaires au lieu d'organismes vivants constitués: le produit étudié provoque la mort d'un certain pourcentage des cellules: on définit alors une cytotoxicité,
- **mutagénicité** : l'ingestion du produit provoque une mutation dans les individus. Le risque de mutagénicité existe quelle que soit la dose ingérée. Le risque est faible si la dose ingérée est faible, et le risque augmente si la dose ingérée augmente,
- **effet cancérigène**: l'exposition de l'individu au produit étudié, ou son ingestion par l'individu provoque l'apparition d'une tumeur maligne. Comme pour l'effet mutagène, l'effet cancérigène existe quelle que soit la dose ingérée.

2.5.2.2. Impuretés principales

- **Métaux**

Le cadmium, le chrome, le plomb, le mercure, le selenium, l'arsenic doivent en particulier être retirés de l'eau. Ils sont généralement adsorbés sur les matières en suspension présentes dans l'eau brute et l'élimination de ces matières en suspension suffit alors à garantir leur élimination. Dans certains cas, les métaux peuvent être complexés, soit à des matières organiques naturelles (exemple le mercure), soit à des composés chimiques rejetés par les industries ou les ménages. Le traitement doit être capable de détruire ce complexe pour en assurer l'élimination. .

- **Nitrates**

Les nitrates, dont on constate une augmentation générale de la concentration dans les eaux brutes, doivent être éliminés car leur nuisance a été reconnue lorsqu'ils sont présents en grande concentration dans l'eau de consommation. Ils sont à l'origine de la méthémoglobinémie des nourrissons.

- **Fibres d'amiante**

Si l'amiante a été reconnue comme étant cancérigène dans l'air par inhalation, l'effet cancérigène des fibres d'amiante contenues dans l'eau de boisson n'a pas été directement démontré. Il est cependant souhaitable de les éliminer le mieux possible, les fibres d'amiante pouvant être entraînées dans la vapeur d'eau (ébullition, douches,...). La réduction de la turbidité permet d'en assurer une élimination raisonnable.

- **Dureté**

Elle n'a pas d'effet tangible sur la santé, mais l'adoucissement de l'eau par échange d'ion en cycle sodium conduit à une augmentation de la teneur en sodium de l'eau; une forte teneur en sodium semble favoriser l'hypertension

- **Fluor**

Une concentration en fluor trop imp ortante provoque la fluorose des os. Il est, dans ce cas, indispensable de réduire la concentrat-ion en fluor

2.6. IMPURETÉS ORGANIQUES

De nombreuses substances organiques naturelles sont présentes dans les eaux, souterraines ou de surface. Elles se classent en 6 groupes principaux: substances humiques, acides hydrophiliques, acides carboxyliques, peptides et amino- acides, hydrates de carbone et hydrocarbures.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La figure 13 donne la composition des fractions de carbone organique trouvées dans une eau naturelle, classées d'après leur masse molaire (MM).

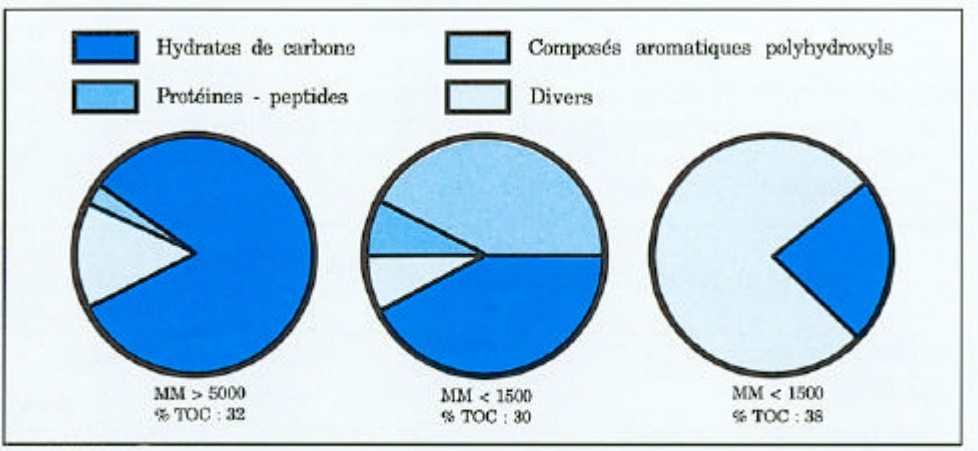


Figure 13. Distribution des fractions de carbone organique de l'eau de Seine (D'après Bruchet - 1985).

On trouve également des substances organiques provenant des activités urbaines.

Les substances organiques sont caractérisées analytiquement soit par la mesure d'indices globaux, soit par la mesure de groupes réactionnels, soit encore par la mesure de substances bien définies.

2.6.1. Paramètres globaux

Ce sont des mesures dont le résultat n'exprime pas une concentration en une substance chimique organique bien définie, mais concerne une caractéristique commune à plusieurs substances.

L'oxydabilité au permanganate et le **carbone organique total** rendent compte de la concentration en matières organiques qui peuvent être d'origine naturelle (acide fulvique, acide humique) ou provenir de déversements urbains ou industriels. Il est souhaitable que la concentration de ces facteurs dans l'eau traitée soit réduite le plus possible, pour éviter tout développement de micro-organismes dans le réseau de distribution.

L'absorption mesurée en ultraviolet à 254 nm rend compte de la concentration en doubles liaisons (aliphatiques, carboxyliques, benzéniques).

Le CLOT (ou XOT) rend compte de la concentration en matières organiques chlorées (ou halogénées). Il augmente après chloration d'une eau et devra être le plus faible possible à l'arrivée au robinet du consommateur.

- **Utilité des paramètres globaux**

Il est impossible de relier un paramètre global à une mesure de toxicité et/ou de cytotoxicité ou d'effet cancérigène et/ou mutagène, et donc de définir des concentrations limites basées sur un effet quelconque relié à la santé du consommateur. Mais la connaissance des paramètres globaux tout au long d'une filière de traitement permet d'optimiser la conduite d'une installation et de comparer entre elles plusieurs filières.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.6.2. Pesticides et produits phytosanitaires

Ces produits sont utilisés en agriculture dans la lutte contre les ennemis des végétaux. Certains s'hydrolysent assez rapidement mais d'autres sont particulièrement résistants et s'accumulent dans la chaîne alimentaire. Certains de ces produits sont toxiques, et d'autres sont mutagènes ou cancérigènes. L'OMS donne (1985) les ADI pour certains produits.

On rencontre aussi de plus en plus fréquemment la simazine et l'atrazine.

Il importe d'éliminer au mieux ces produits dangereux pour la santé des consommateurs.

Composé ou groupe d'isomères	**Recommandations** µg 1^{-1}	**ADI** mg par kg de personne
DDT (totalité des isomères)	1	0,005
Aldrine et dialdrine	0,03	0,0001
Chlordane (totalité isomères)	0,3	0,001
Heptachlore et hexachlore époxyde	0,1	0,0005
Gamma HCH (hexachlorohexane-lindane)	3	0,01
Methoxychlore	30	0,1
2.4. Dichloro-phénoxy -acétique	100	0,3

2.6.3. Composés haloformes
(cf *§ 2.8)*

2.6.4. Solvants chlorés

De nombreuses eaux profondes ont été contaminées par ces substances: rejets industriels, injection en puits perdus, lixiviat de décharge. Ces substances sont cancérigènes ou mutagènes, et il importe de les éliminer. On peut citer: le tétrachlorure de carbone, le 1.2. Dichloroéthane, le 1.1. Dichloroéthène, le 1.1.1. Trichloroéthane.

2.6.5. Phénols et dérivés

Les phénols et leurs dérivés sont l'indice d'une pollution industrielle. Leur nuisance la plus marquante est le goût de chlorophénol qui apparaît dans l'eau en présence de chlore pour des teneurs extrêmement faibles. Si normalement il suffit de réduire la teneur en phénol pur à 1 µg 1^{-1} pour être à l'abri des goûts, on peut dans certains cas déceler encore des traces de goût de chlorophénol avec une teneur de 0,1 à 0,01 µg 1^{-1}.

Le seuil de détection organoleptique des chlorophénols est largement inférieur aux valeurs qui seraient dangereuses pour la santé du consommateur: on élimera donc ces substances jusqu'à les rendre indétectables au goût.

2.6.6. Hydrocarbures

Les hydrocarbures susceptibles de polluer les eaux de surface ou les eaux souterraines proviennent principalement des rejets de produits pétroliers, d'huiles de vidange, d'effluents de différentes industries ou d'usines à gaz, de vapeurs... Les hydrocarbures aromatiques sont particulièrement solubles.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

On peut trouver du pétrole, du kérosène, de l'essence, du mazout, du fuel, des huiles ou lubrifiants.

Leur biodégradabilité est lente. En cas de pollution accidentelle, leur présence est de durée limitée à la prise d'eau d'une station en rivière alors qu'elle peut être très longue dans une eau souterraine (quelquefois plusieurs années en raison du pouvoir de rétention du sol). C'est la raison pour laquelle les ressources en eaux souterraines doivent être sévèrement protégées contre les risques de contamination par les hydrocarbures

- **Nuisances et toxicité**

- création d'un filin qui nuit à la réoxygénation des eaux de surface et freine leur auto-épuration,

- perturbation des stations de traitement d'eau potable; la floculation et la décantation s'en trouvent affectées et le matériau filtrant risque d'en rester longtemps imprégné,

- apparition de goûts et d'odeurs pour des seuils extrêmement variables suivant les produits (de 0,5 µg 1^{-1} pour l'essence à 1 $mg.l^{-1}$ pour les huiles et lubrifiants),

- toxicité: elle serait à craindre dans les eaux de boisson pour des doses supérieures aux seuils d'apparition d'odeur et de goût. On a constaté des affectations cutanées dues à des produits d'addition du mazout.

2.6.7. Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H.P.A.)

Certaines de ces substances sont hautement cancérigènes, et il importe de les éliminer parfaitement avant distribution. Parmi ces substances, il faut citer le benzo (3,4) pyrène, le benzo (11,12) fluoranthène, le benzo (1,12) perylène, le benzo (3,4) fluoranthène, l'indeno (1,2,3-Cd) pyrène.

2.6.8. Polychlorobiphényls (PCB)

Ces produits se sont développés au cours des dernières années pour différents usages: plastifiants, solvants, lubrifiants, fluides hydrauliques caloporteurs. Ils ont en particulier été utilisés dans la fabrication de transformateurs et condensateurs. Ils sont connus en France sous le nom commercial de Pyralène.

Par combustion ou pyrolyse, ils peuvent donner naissance à des produits suspectés d'être très toxiques: les polychlorodibenzofurannes ("furannes") et les polychlorodibenzodioxines ("dioxines"). Ces produits sont particulièrement stables et se sont, à ce titre, répandus dans l'environnement. Ils sont assimilables par les organismes vivants et peuvent se transmettre dans les chaînes alimentaires. Sans avoir été formellement démontrée, leur nocivité est fortement suspectée.

2.6.9. Détergents

Les détergents sont des composés tensioactifs synthétiques dont la présence dans les eaux est due aux rejets d'effluents urbains et industriels.

Les produits commerciaux renferment des composants actifs: les agents de surface et les adjuvants.

- **Agents de surface:** leur structure permet de modifier les propriétés physiques des surfaces en abaissant les tensions superficielles et leur confère une action de nettoyage. On distingue

- les agents de surface anioniques: les substances les plus couramment utilisées ont été longtemps des produits "durs" ou peu biodégradables à chaîne

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ramifiée tels que les alkylbenzènes sulfonates (ABS), qui sont les principaux responsables des problèmes posés par la présence de détergents dans les eaux. Ils ont généralement été remplacés par des détergents à chaînes linéaires, biodégradables au moins à 80%.

La mesure de la concentration des agents de surface anioniques s'effectue sans difficulté par dosage au bleu de méthylène; on peut donc suivre aisément leur biodégradabilité dans le temps,

- les agents de surface non ioniques (ceux utilisés actuellement sont à base d'alkylphénols voire d'alcools polyéthoxylés). Leur emploi tend à se développer mais leurs méthodes de dosage posent encore des problèmes,

- les agents de surface cationiques, constitués par des sels d'ammonium quaternaires, sont peu employés et réservés à des usages particuliers liés à leurs propriétés biostatiques.

- **Les adjuvants**

Parmi eux figurent

- les adjuvants proprement dits tels que polyphosphates, carbonates, silicates,

- les séquestrants et complexants (poly-phosphates...),

- les renforçateurs, améliorant l'action des principes actifs (oxydes aminés, carboxyméthylcellulose, alkanolamidés),

- Les additifs: agents de blanchiment, perborates, azurants optiques, colorants, parfums,

- les charges de sels minéraux, améliorant la présentation des produits,,

- les enzymes qui sont considérés comme des préadjuvants et qui participent à l'hydrolyse de certaines salissures.

- **Concentrations observées dans les eaux**

Avant l'adoption des produits biodégradables, les concentrations en détergents anioniques variaient dans les eaux de rivières de 0,05 à 6 $mg.l^{-1}$. Elles diminuent depuis.

Les concentrations en détergents nonioniques sont difficiles à exprimer du fait de la multiplicité des méthodes de dosage, de leur précision et de leurs limites de détection.

- **Nuisances**

Les nuisances créées par la présence des détergents dans l'eau sont

- la formation de mousses qui freinent les processus d'épuration naturelle ou artificielle, concentrent les impuretés et sont susceptibles de disséminer bactéries et virus; des concentrations en détergents anioniques supérieures ou égales à 0,3 $mg.l^{-1}$ sont suffisantes pour obtenir une mousse stable,

- le ralentissement du transfert et de la dissolution de l'oxygène dans l'eau, même en l'absence de mousse, par création d'un filin isolant apparaissant en surface,

- l'apparition de goût de savon, pour des teneurs nettement supérieures au seuil de moussage,

- l'augmentation de la teneur en phosphate provenant des polyphosphates combinés aux agents de surface, qui facilite l'eutrophisation des lacs et le développement planctonique dans les rivières; dans certains pays, une grande partie des polyphosphates est remplacée par le N.T.A. (acide nitrilotriacétique),

- l'augmentation progressive de la teneur en bore des eaux superficielles et profondes, provenant des quantités importantes de perborate de sodium utilisées dans les détergents.

Les détergents ne sont pas toxiques vis-à-vis des bactéries, des algues, du poisson et des autres organismes d'une rivière, du moins tant que la concentration demeure inférieure à 3 $mg.l^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Enfin, les enzymes récemment ajoutés aux détergents n'apportent aucune nuisance aux milieux récepteurs ni aux stations.

L'introduction de détergents dont le seuil de biodégradabilité est porté à 80% conduit à une amélioration très sensible, au moins pour les détergents anioniques que l'on sait bien contrôler.

Les détergents non-ioniques posent des problèmes en ce sens qu'ils favorisent la formation de mousses par les anioniques et la stabilisent. Les non-ioniques actuellement utilisés sont réfractaires à la biodégradation, en particulier par temps froid.

2.7. RADIOACTIVITÉ

L'ingestion de produits radioactifs peut avoir sur l'homme un effet somatique, conduisant à l'apparition de tumeurs malignes, ou un effet mutagène qui se révèle sur la descendance de l'homme.

L'eau produite doit être conforme à la législation en vigueur dans chaque pays. Les traitements à appliquer sont la précipitation à la chaux, l'échange d'ions ou l'osmose inverse.

2.8. POLLUTION INDUITE

L'introduction d'un réactif dans l'eau peut conduire à deux formes de pollution: les impuretés du réactif lui-même et les produits de réaction du réactif avec les matières organiques de l'eau.

2.8.1. Impuretés dues au réactif

Dans de nombreux pays, l'utilisation d'un réactif est soumise à l'agrément des autorités sanitaires. La législation peut prévoir, pour chaque réactif, une concentration maximale d'impuretés à respecter par le producteur. Une analyse précise des produits doit être effectuée. Au cas où l'on constate la présence d'impuretés, il importe de vérifier que la chaine de traitement prévue en permet l'élimination.

- **Coagulants minéraux**

Certains coagulants sont préparés à partir de minerais ou métaux pouvant contenir des impuretés en quantité non négligeable: attaque acide de bauxite pour préparer le sulfate d'aluminium, attaque de carcasses métalliques pour préparer le chlorure ferrique. Cette attaque dissout également des impuretés (tungstène, manganèse, arsenic).

D'autres coagulants sont préparés à partir de sous produits d'une autre industrie. Le chlorosulfate ferrique, préparé à partir de sulfate ferreux provenant de l'industrie du titane, peut contenir une quantité importante de manganèse.

- **Polyélectrolytes, adjuvants**

Les polyélectrolytes de synthèse sont préparés par polymérisation de monomères (polyacrylamides, polyamines ...).

En traitement d'E.P., la législation de chaque pays peut fixer le type de monomère utilisable, la teneur maximale en monomère tolérable dans le polymère et le taux de traitement maximal qu'il est possible de mettre en ceuvre (0,5 % de monomère acrylamide dans le cas des polyacrylamides par exemple).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Correction de pH**

Il faudra vérifier les impuretés de la chaux et de la soude qui doit être exempte de mercure (soude préparée par le procédé à membrane).

- **.Désinfection par le chlore**

La désinfection par le chlore étant l'étape ultime du traitement, avant désinfection, il importe de vérifier la pureté du produit.

- **Air d'entraînement ("stripping")**

L'air utilisé au cours de certaines étapes du traitement peut apporter des éléments indésirables: impuretés de l'atmosphère, gaz d'échappement, fumées, bactéries...

2.8.2. Impuretés par réaction du réactif sur les matières organiques de l'eau

Lors des phases d'oxydation intervenant au long d'une chaîne de traitement, les oxydants (ozone, dioxyde de chlore, chlore) peuvent réagir sur les matières organiques présentes dans l'eau. En particulier le chlore réagit sur certaines de celles-ci (= précurseurs) pour donner naissance aux composés haloformes.

Cette réaction peut se faire soit directement par le chlore présent dans l'eau sous forme ClO^-, soit par un autre halogène (brome ou iode) qui peut avoir été déplacé par le chlore (on aura alors XO^- qui réagira, sur ces matières organiques pour former des composés organo-halogènes).

La réaction de base pour la formation des composés trihalométhanes est la suivante

$$R-\overset{\overset{O^-}{|}}{\underset{||}{C}}-CH_3 + 3\,OX^- \rightarrow R-\overset{\overset{O}{||}}{C}-O^- + CHX_3 + 2OH^-$$

Les matières organiques carbonnées qui peuvent donner lieu à cette réaction sont principalement les méthylcétones, ou, d'une manière plus générale, tous les produits organiques, qui, par oxydation, peuvent être oxydés en méthylcétones.

La chloration des composés organiques conduit également, à la formation d'autres composés qui n'ont pas été encore, à ce jour, tous identifiés (cf. figure 14).

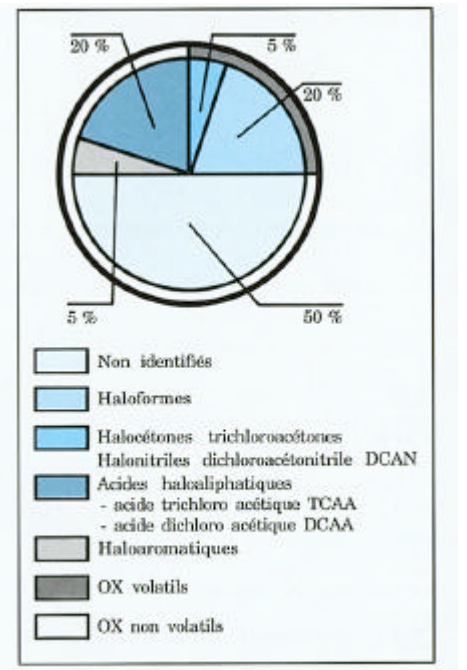


Figure 14. Composés halogénés présents après chloration d'une eau.

- **Nuisance**

Tous ces produits sont suspectés d'être cancérigènes. Il importe que les filières mises en place et la conduite des installations de traitement permettent de produire une eau dont la teneur en trihalométhanes et organochlorés soit la plus faible possible.

Il ne faut pas oublier que la recherche d'une diminution de la teneur en composés organochlorés ne doit pas se faire au détriment d'une bonne désinfection de l'eau distribuée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.9.
POLLUTION EXOGÈNE

Les matériaux constitutifs de certains produits utilisés pour le traitement de l'eau peuvent être à l'origine de pollution. C'est, par exemple, le cas de résines échangeuses d'ions ou de membranes. Certaines législations prévoient une liste des produits autorisés pour la fabrication de ces résines (ou membranes); des tests ont été définis pour vérifier qu'il n'y a aucun relargage lors de l'utilisation au sein d'une chaîne de traitement (élimination des nitrates par résines échangeuses d'ions par exemple).

Les matériaux constitutifs du réseau de distribution peuvent également être à l'origine de pollution: solvants utilisés pour la peinture et le revêtement des ouvrages, monomères et additifs employés lors de la fabrication des tuyauteries en plastique, métaux de la robinetterie ou même plomb des tuyauteries (risque de saturnisme) en particulier dans les réseaux privés. Certains de ces matériaux peuvent relarguer du carbone organique susceptible de servir de nourriture aux bactéries banales et de favoriser leur prolifération dans le réseau de distribution; ils peuvent également provoquer l'apparition de mauvais goûts.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. LES EAUX INDUSTRIELLES

Figure 15. Tours de refroidissement d'une centrale nucléaire.

3.1. UTILISATIONS DE L'EAU ET QUALITÉS RECHERCHÉES

Les qualités nécessaires dans l'industrie sont variées et correspondent à des emplois de valeur ajoutée inégale. Si les petites et moyennes entreprises peuvent souvent se satisfaire d'eau potable ou d'un forage, la taille et la situation des grandes usines les conduisent à utiliser des sources moins coûteuses pouvant aller jusqu'à l'eau de mer.

De plus, l'importance croissante des besoins justifie le recyclage de ces eaux et la variété des fonctions de l'eau conduit souvent à des recommandations de qualité.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.1.1. Utilisations élémentaires de l'eau

Utilisation	**Applications principales**
Vaporisation	Chaudières, humidification d'air.
Échange thermique	Condensation vapeur, refroidissement fluides et solides, chauffage
Lavage de gaz	Sidérurgie, incinération ordures ménagères, désulfuration de fumées
Lavage de solides Transport de solides Rinçage de surfaces Transport d'ions	Charbon, minerai, produits agricoles Pâtes à papier, charbon, pulpes, I.A.A. pigments électrophorèse Traitement de surfaces, semi-conducteurs, micro-électronique, teintureries, I.A.A., Bains traitement de surface, fluides coupe aqueux
Extinction	Coke, laitier, granulation, fonte.
Maintien de pression	Récupération secondaire pétrole.
Énergie cinétique	Décalaminage d'acier, granulations diverses(laitier, écriquage).
Fabrication	Bières et boissons gazeuses.

L'eau peut être destinée (figure 16) :

- à une seule utilisation :

- en **circuit ouvert** ou en appoint direct,
- en **recyclage,** avec ou sans altération;

- à deux utilisations différentes successives :

- **réutilisation.**

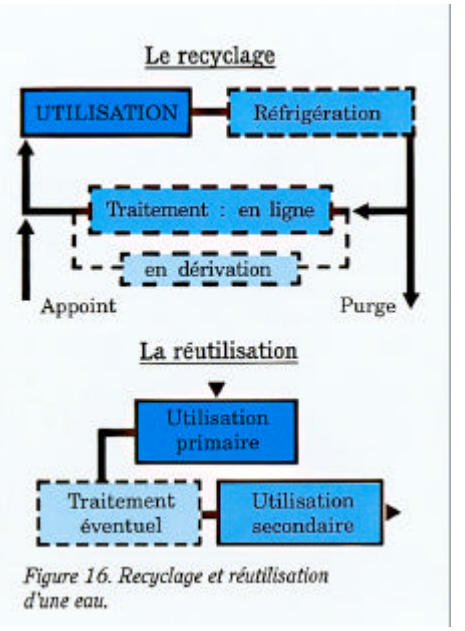


Figure 16. Recyclage et réutilisation d'une eau.

Le recyclage

3.1.2. Recyclage sans altération de l'eau

Ce recyclage consiste à employer indéfiniment une mémé eau dans une mémé utilisation non polluante. L'appoint compense des pertes diverses sous forme liquide (fuites, entraînements, primage) ou sous forme vapeur lorsque, cas fréquent, il y a évaporation. Normalement, il ne se produit pas d'altération sensible de l'eau par apport d'ions étrangers, solubilisation de gaz ou dispersion de matières organiques ou minérales lors de l'utilisation. Seuls les sels initiaux se trouvent concentrés par évaporation et accumulés.

Les deux exemples usuels de ce recyclage propre sont le refroidissement avec réfrigérant atmosphérique, appelé "circuit semi-ouvert" et l'utilisation en chaudière avec retour de condensats (voir page 49 et page 59).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le taux de recyclage peut être élevé et l'accroissement de concentration des différents sels dissous par l'évaporation nécessitera l'épuration préalable des sels les moins solubles de l'eau d'appoint et une purge de déconcentration de l'eau du circuit

L'estimation du **taux de concentration** C dans de tels recyclages est fondamentale et repose sur le rapport de la quantité d'eau apportée ou appoint A à la quantité d'eau éliminée sous forme liquide ou déconcentration D.

$$C = \frac{A}{D}$$

Si E représente l'évaporation, en première approximation, le taux de concentration peut s'exprimer par le rapport des salinités de l'eau du circuit S et de l'eau d'appoint s

$$C = \frac{S}{s} = \frac{A}{D} = \frac{E + D}{D}$$

On utilise aussi le **taux de recyclage R** ou rapport Â du débit de circulation sur le débit d'eau d'appoint.

Dans un circuit de refroidissement semi-ouvert, C peut varier de 1 à 6 voire 10. Ce taux est mesurable pratiquement à partir du rapport de la concentration en chlorure dans un tel circuit à celle de l'appoint, car il n'y a pas d'apport extérieur de chlorures. Dans une chaudière, C est beaucoup plus élevé (100, par exemple dans une PWR).

3.1.3. Recyclage avec altération de l'eau

Il s'agit toujours du réemploi d'une eau dans une utilisation polluante qui entraîne l'introduction de composés étrangers à l'eau d'appoint Cette utilisation peut être

- **conjointe à un refroidissement:**

- lavage de gaz avec présence d'HCl (incinération d'ordures ménagères),
- lavage de gaz avec présence de $S0_2$ (fumées de chaudières),
- lavage de gaz avec présence de HF, HCN (gaz de hauts fourneaux, etc.),
- décalaminage d'acier et arrosage de laminoirs avec entraînement d'huiles et de battitures,
- granulation (ou prilling) d'engrais azotés, avec solubilisation d'azote ammoniacal,
- transport de laitier et extinction de coke, avec solubilisation de composés du soufre.

- **sans fonction de refroidissement**

- rinçages en galvanoplastie avec introduction plus massive de sels solubles,
- lavage de gaz dans l'industrie des phosphates,
- transport de matières premières avec introduction de matières en suspension et aussi de sels (lavoirs divers, hydrométallurgie).

Le taux de concentration en sels n'est plus dû à la seule évaporation et devient en pratique souvent difficile à mesurer si des chlorures sont introduits de l'extérieur. De plus, par condensation d'humidité, il peut y avoir un apport difficile à apprécier d'eau d'appoint (lavage de gaz humides).

Le taux de recyclage R permet alors seul d'estimer le degré d'utilisation de l'eau d'appoint

Suivant l'importance de la pollution apportée au système, celle-ci doit être déconcentrée par un poste d'épuration placé sur le circuit ou en dérivation (cf. figure 16).

Si la pollution est considérable (cas des eaux de lavage de gaz), la salinité et les impuretés de l'eau d'appoint deviennent un paramètre secondaire et cette dernière ne requiert plus d'épuration primaire. Le problème à résoudre s'apparente beaucoup plus à celui des effluents industriels recyclés (cf. sous-chapitre 5).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Si la pollution est faible (cas extrême des boucles d'eau ultra-pure), les impuretés de l'eau d'appoint justifient un traitement très important de celle-ci, le traitement en ligne du circuit devient quantitativement mais non qualitativement mineur.

3.1.4. Réutilisation d'eau

Le recyclage peut ne pas être un moyen d'économie d'eau suffisant face à des disponibilités trop rares. La réutilisation d'eau est un autre moyen qui consiste à employer l'eau successivement à deux fonctions différentes, avec éventuellement une phase intermédiaire de reprise ou de traitement.

La seconde utilisation est souvent moins "noble" que la première et alors un traitement intermédiaire peut devenir inutile. Par exemple, la purge d'un circuit semi-ouvert de gaz d'aciérie à oxygène peut alimenter directement le circuit de lavage de gaz de hauts fourneaux

Tableau 3. Principales utilisations industrielles de l'eau et sources d'eau possibles.

Utilisation		**Sources d'eau acceptables** (souvent après un traitement adéquat)
Eau de fabrications nobles	- Bières, boissons gazeuses - Agro-alimentaire - Pharmacie - Papiers blancs - Textiles - Teintureries - Chimie	Eaux moyennement minéralisées Eau potable ou Eaux de forage ou Eaux de surface peu polluées
Eau déminéralisée	- Pharmacie - Chaudières MP et HP - Préparation de bains divers - Rinçages en galvanoplastie - Eau ultra-pure - Dessalement par osmose inverse	Eaux de forage ou de surface peu polluées
Eau de refroidissement en circuit semi-ouvert	- Réfrigération atmosphérique	- Eaux de surfaces pauvres en Cl^- - Effluents après traitement tertiaire
Eau de refroidissement en circuit ouvert	- Condenseurs et échangeurs	- Eaux de surface - Eaux de mer - Effluents après traitement
Eau de lavage de gaz ou produits de transport	- Lavage gaz métallurgique et incinération - Lavage charbon	- Eaux de surface tamisées et prédécantées - Effluents secondaires

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.1.5. Choix des sources d'eau

Indépendamment de l'aspect économique, les critères de ce choix quand il est possible, sont les suivants :

- compatibilité de l'eau avec ses utilisations: équilibre calcocarbonique, dureté, température et, en cas de concentration, teneurs en $S0_2$, SiO_2, Ca_2+, Cl^-,
- compatibilité de l'eau avec certains types de traitements envisagés (membranes, échangeurs d'ions).

Le tableau 3 propose un choix des sources d'eau disponibles en fonction de leur utilisation. Il faut faire attention aux paramètres qu'il sera difficile de corriger par une épuration intermédiaire simple (Couleur, M.O., HPA, S04, etc.).

L'eau de mer peut être utilisée sans réduction de salinité dans les deux applications suivantes

- refroidissement de condenseurs,
- récupération secondaire "offshore".

Elle nécessite un traitement de dessalement dans les autres cas.

3.2. LES EAUX DE CHAUDIÈRES

3.2.1. Cycle de l'eau dans une chaufferie

Quel que soit le type de chaudière considéré, on peut schématiser très simplement le cycle de l'eau de la manière suivante (figure 17)

L'appareil reçoit de l'eau d'alimentation qui est constituée par une proportion variable d'eau condensée récupérée, dite "eau de retour" et d'eau neuve, plus ou moins épurée, dite "eau d'appoint".

La vapeur, qui s'échappe de la zone de vaporisation, contient fréquemment des vésicules liquides (primage), des gaz (en particulier le gaz carbonique). Aux pressions élevées, elle véhicule dés sels volatilisés par un véritable "entraînement à la vapeur", tels que de la silice et, aux très hautes températures, des chlorures.

L'eau restée sous forme liquide à la partie inférieure de la chaudière se charge de toutes les substances que contenait l'eau qui a été vaporisée (à l'exception de celles qui ont été entraînées dans la vapeur).

La déconcentration nécessaire est appelée "purge" ou "extraction" par envoi à l'egoût d'une fraction de l'eau de la chaudière.

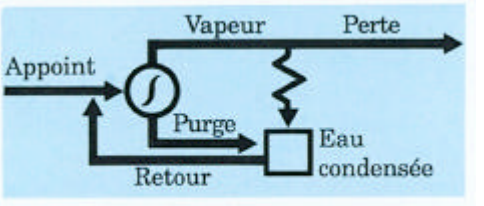


Figure 17. Cycle de l'eau en chaudière.

Si une chaudière est en régime continu, et si, pour simplifier, on admet que la salinité entraînée dans la vapeur est négligeable, l'équilibre stable des concentrations est atteint lorsque la masse de sels évacuée par les extractions à l'égout est égale à la masse de sels amenée par l'eau d'appoint (puisque l'eau condensée est supposée pure). On a donc à l'équilibre

$$A \times s = D \times S$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

A : débit d'eau d'appoint de concentration s ;
D : débit des extractions ou purge;
S : concentration en chaudière.

$$S = s \times \frac{A}{D}$$

Si la vapeur est entièrement perdue, et si la capacité du poste de traitement est exprimée, non en production d'eau d'appoint mais en production de tonnes T de vapeur, on ne doit pas oublier que A = T + D et le facteur de concentration s'exprime alors par

$$\frac{S}{s} = \frac{T + D}{D}$$

En pratique, le pourcentage admissible de purges dans une installation est limité par des considérations économiques d'exploitation et d'investissement. On tend à réduire ce taux à des valeurs de plus en plus faibles.

3.2.2. Cas des générateurs nucléaires et des chaudières à circulation forcée

Certains générateurs utilisés dans les centrales nucléaires ne comportent pas de ballon, ni de possibilités d'extraction, de telle sorte que toutes les impuretés dissoutes dans l'eau d'alimentation se retrouvent sur les surfaces de vaporisation ou dans la vapeur. Le mode de calcul ci-dessus est donc inapplicable, et on doit limiter impérativement d'une façon générale les substances étrangères à l'eau aux limites que l'on peut tolérer dans la vapeur.

Il en est de même de toutes les chaudières classiques de la catégorie à circulation forcée ou de chaudières de l'industrie chimique dites "chaudières de récupération" qui sont caractérisées par l'absence de ballon et par une déconcentration en purge continue.

3.2.3. Inconvénients provoqués par les impuretés de l'eau

Les accidents que l'eau peut provoquer dans une chaudière ou dans une turbine sont:

- . **Les incrustations** dues au dépôt sur les parois de la chaudière de précipités cristallins, qui, gênant la transmission de la chaleur, provoquent des surchauffes locales et sont à l'origine des "coups de feu". Elles sont d'autant plus dangereuses qu'elles sont moins conductrices. Les grandeurs relatives de leur conductibilité thermique sont les suivantes

- acier	15	kcal/m^2.h par degré C
- $CaSO_4$	1 à 2	kcal/ m^2.h par degré C
- $CaCO_3$	0,5 à 1	kcal/ m^2.h par degré C
- SiO_2	0,2 à 0,5	kcal/ m^2.h par degré C

Ces incrustations sont dues principalement à la présence dans l'eau de sels de calcium (carbonates ou sulfates) moins solubles à chaud qu'à froid, ou à une trop forte concentration en silice par rapport à l'alcalinité de l'eau dans la chaudière. Dans les chaudières à très forte vaporisation, il peut y avoir sursaturation de sels dans le filin superficiel surchauffé ou séquestration (hide out) avec une salinité moindre de la purge.

- **.le primage,** entraînement plus ou moins important de vésicules liquides dans la vapeur (mousse et brouillard), qui provoque à la fois une baisse de rendement énergétique de la vapeur et le dépôt de cristaux salins sur les surchauffeurs et sur les turbines. Il est en relation avec la viscosité et la tendance au moussage de l'eau. Celles-ci sont fonction de l'alcalinité, de la présence de certaines substances organiques et de la salinité totale. L'importance du primage dépend aussi des caractéristiques de la chaudière et de son régime de vaporisation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- .**L'entraînement dans la vapeur** de corps minéraux volatils à la température d'ébullition, dont le plus nocif est celui de la silice qui se produit au-dessus de 250°C. Ces sels se déposent sur les ailettes des turbines entraînant de graves désordres dans leur fonctionnement. Les entraînements sont d'autant plus imp ortants que la pression, et donc la température, sont plus élevées. Ils sont en relation avec la concentration des éléments concernés dans l'eau du ballon.
- . **Les corrosions** d'origine et de nature très variées dues, soit à l'action de l'oxygène dissous, soit à des courants de corrosion provenant d'hétérogénéités sur les surfaces métalliques, soit encore à l'attaque directe du fer par l'eau. Avant d'aborder l'étude des moyens de correction, il faut examiner la concentration des divers éléments dangereux à respecter dans la phase liquide en fonction des caractéristiques de la chaudière et éventuellement de celles de la turbine. A partir de ces valeurs, et compte tenu des possibilités d'extraction des purges, les valeurs correspondantes à respecter dans l'eau d'appoint se trouvent définies.

3.2.4. Caractéristiques à maintenir dans l'eau d'un générateur de vapeur conventionnel

Étant donné la tendance à accroître le taux de transmission calorifique à travers les surfaces chauffées des chaudières modernes, on ne peut donner que des fourchettes assez larges pour les valeurs d'alcalinité, salinité, silice, phosphates, etc., à respecter en fonction des pressions de service. Les valeurs limites réelles doivent être demandées au constructeur de la chaudière, en fonction des caractéristiques de celle-ci.

Un point particulièrement controversé est la teneur limite en NaOH, qui est d'autant plus basse que le taux de vaporisation par m^2 de tube est important. Par contre, dans les chaudières à basse et moyenne pression, elle peut être relevée si l'on utilise un conditionnement antiprimage.

On trouvera, ci-après, les extraits des recommandations des APAVE (tableaux 4a, 4b, 4c) jusqu'à des pressions de service de 100 bars, pour des taux de vaporisation modérés et des volumes de ballon permettant de régler correctement les taux d'extraction.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 4a. Caractéristiques des eaux pour les chaudières à tubes de fumée (jusqu'à 25 bars).

Pression de service	=10 bar	10-15 bar	15-2 5 bar
Eau d'alimentation conditionnée(eau d'appoint épurée + retours) pH	= 8,5	= 8,5	= 8,5
TH (°F)	< 0,5	< 0,5	< 0,2
O_2	Élimination physique de l'oxygène dissous par dégazage thermique et/ou utilisation de réactifs réducteurs ou inhibiteurs de corrosion.		
Matières huileuses	**absence**		
Eau de chaudière			
TAC (°F)	=120	=100	=80
TA (°F)	TA ˜ 0,7 TAC	TA ˜ 0,7 TAC	TA ˜ 0,7 TAC
Si O_2 ($Mg.l^{-1}$)	< 200	< 200	< 150
$Si0_2$*/ TAC	=2,5	=2,5	=2
Salinité totale			
($mg.l^{-1}$)	=5 000	=4 000	=3 000
$C1^-$	= 1000	=800	=600
Phosphates			
PO_4^{3-} ($mg.l^{-1}$)	30 à 100	30 à 100	30 à 100
pH	10,5à12	10,5à12	10,5à12

* Ce rapport doit être équivalent à celui de l'eau d'alimentation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 4b. Caractéristiques des eaux pour les chaudières à tubes d'eau. Circulation naturelle. - Eau d'appoint adoucie ou décarbonatée adoucie.

Pression de service	= 15 bar	15-25 bar	25-35 bar	35-45 bar
Eau d'alimentation conditionnée(eau d'appoint épurée + retours) pH	= 8,5	= 8,5	= 8,5	= 8,5
TH (°F)	< 0,5	< 0,2	< 0,2	< 0,1
O_2	Élimination physique de l'oxygène dissous par dégazage thermique et/ou utilisation des réactifs réducteurs ou inhibiteurs de corrosion.		Élimination physique de l'oxygène dissous par dégazage thermique et utilisation de réactifs réducteurs ou inhibiteurs de corrosion.	
Matières huileuses	**Absence**			
Eau de chaudière				
TAC (°F)	= 100	= 80	= 60	= 40
TA (°F)	TA ˜ 0,7 TAC	TA ˜ 0,7 TAC	TA ˜ 0,7 TAC	TA ˜ 0,7 TAC
Si O_2 ($Mg.l^{-1}$)	= 200	= 150	= 90	= 40
$Si0_2$*/ TAC	= 2,5	= 2	= 1,5	= 1
Salinité totale				
($mg.l^{-1}$)	< 4 000	< 3 000	< 2 000	< 1500
$C1^-$	= 800	=600	=400	=300
Phosphates				
$P0_4^{3-}$ ($mg.l^{-1}$)	30 à 100	30 à 100	20 à 80	20 à 80
pH	10,5à12	10,5à12	10,5à12	10,5à12

* Ce rapport doit être équivalent à celui de l'eau d'alimentation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 4c. Caractéristiques des eaux pour les chaudières à tubes d'eau. Circulation naturelle. - Eau d'appoint déminéralisée.

Pression de service	40-60 bar	60-75 bar	75-100 bar
Eau d'alimentation conditionnée(déminéralisée + retours) pH	= 8,5	= 8,5	= 8,5
TH (°F)	< 0,05	< 0,05	< 0,05
O_2	Élimination physique de l'oxygène dissous par dégazage thermique efficace (O_2 < 0,02 mg.l^{-1}) et utilisation de réactifs réducteurs ou inhibiteurs de corrosion.		
Matières huileuses (mg.l^{-1})	< 0,05		
Fe total maxi (mg.l^{-1})	< 0,05	< 0,05	< 0,03
Cu total Max (mg.l^{-1})	< 0,03	< 0,03	< 0,01
Eau de chaudière			
TAC (°F)	= 15	= 10	= 5
TA	TA = 0,5 TAC impératif		
Si O_2 (Mg^{-1})	= 15	= 10	= 5
Si O_2* /TAC	<1	<1	< 1
NaOH libre (mg.l^{-1})	< 20	< 10	< 5
pH	10à11	10à11	9,5à10,5
Salinité totale (mg.1^{-1})	< 500	< 300	< 100
Phosphates $P0_4^{3-}$ (mg.l^{-1})	10 à 60	10 à 40	5 à 20

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Autres recommandations de qualité de l'eau alimentaire

Par expérience, il est conseillé de limiter aussi d'autres polluants susceptibles de rentrer en chaudière

Caractéristiques en mg.l^{-1}	**Pression de service**	
	< 40 bars	40 à 70 bars
Fer total	< 0,2	< 0,1
Cuivre	< 0,020	< 0,010
Matières organique (exprimées en $KMnO_4$)	< 5	
COT	<5-7	-
Huiles et Hydrocarbures	< 0,2	-
MES	< 1	-

Contrôle de l'eau des chaudières BP et MP

Avec le développement du contrôle automatique des chaufferies, on peut limiter le contrôle manuel aux éléments suivants (1 fois par jour en BP et une fois par semaine en MP).

	Eau épurée	Alimentation chaudière	Chaudière
pH	X	X	X
TH	X	X	
TA - TAC	X	X	X
SiO_2	X	X	X
PO_4			X
N_2H_4/SO_3^{2-}			X

3.2.5. Chaudières à haute pression ou flux thermique élevé

Pour ces chaudières très poussées, on doit réduire autant que possible les sels dissous et donc supprimer le conditionnement au phosphate.

On ne peut alors définir de valeurs limites pour la salinité et le TAC à respecter en chaudière, puisque le désiliciage poussé des eaux d'appoint réduit simultanément la salinité totale à l'état de traces. Salinité et TAC en chaudière dépendent donc essentiellement du mode de conditionnement.

Des conditions très restrictives concernant les eaux alimentaires ou de chaudières peuvent être énoncées par les constructeurs de chaudières eux-mêmes, auxquels on doit se référer.

Les condensats de retour peuvent entraîner des impuretés dans l'eau alimentaire telles que :

- sels dissous (fuites au condenseur ou primage en chaudière),
- produits de corrosion provoqués par une entrée d'oxygène.

Le traitement des condensats est alors parfois justifié.

3.2.6. Centrales avec réacteur à eau sous pression (REP ou PWR)

3.2.6.1. Organisation

Ces centrales à eau pressurisée comportent deux circuits distincts (cf figure 18) :

- le circuit primaire qui assure l'extraction des calories du coeur du réacteur ; ce circuit est dit actif,
- le circuit secondaire où se produit la vaporisation et qui comporte la turbine, le condenseur, éventuellement le traitement des condensats, les réchauffeurs et la pompe alimentaire ; sauf en cas de fuite au niveau du générateur, ce circuit n'est pas actif.

Au niveau du cricuit primaire, l'eau est maintenue à l'état liquide sous une pression d'environ 150 bars, pour une température sortie réacteur de l'ordre de 320°C (température retour 280 °C).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le circuit primaire est conditionné avec deux réactifs

– l'hydroxyde de lithium pour maintenir un pH basique et éviter les corrosions,

– l'acide borique qui joue le rôle de modérateur du flux de neutrons et permet de contrôler la puissance fournie par le réacteur.

Terminologie E.D.F. des circuits

A.P.G.: Circuit des purges des générateurs de vapeur (G.V) (Steam generator blowdown system).

G.V : Générateur de vapeur.

P.T.R. : Circuit de traitement et de refroidissement de l'eau des piscines (Reactor cavity and spent fuel pit cooling and treatment system).

R.C.V. : Circuit de contrôle chimique et volumétrique (Chemical and volume control system).

T.E.P.*: Traitement des effluents primaires (Boron recycle system).

T.E.U.*: Traitement des effluents liquides usés (Liquid waste treatment system).

3.2.6.2 Contrôle des circuits

La maîtrise totale des corrosions est requise dans les deux circuits dont les eaux doivent satisfaire des spécifications sévères.

- **Circuit primaire**

Tableau 5a - Eau d'appoint du circuit primaire.

Paramètre	Unité	Valeur attendue	Valeur limite
Oxygène	$mg.kg^{-1}$		< 0,10
Chlorure + Fluorure	$mg.kg^{-1}$		< 0,10
Sodium	$mg.kg^{-1}$		< 0,015
Conductivité totale à 25	$\mu S.cm^{-1}$		< 1,0
		25	
Silice totale ou ionisée	$mg.kg^{-1}$		< 0,1

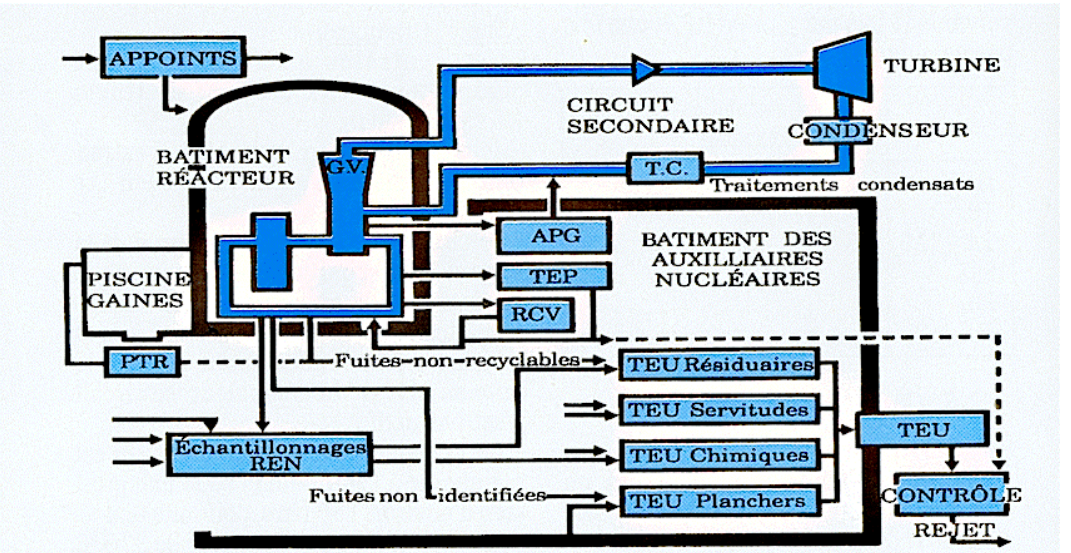


Figure 18. Circuits des centrales REP.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le cycle de circulation est de l'ordre de 1 minute. Diverses impuretés radioactives provenant de microfuites au niveau des gaines de combustible ou de l'activation des produits de corrosion peuvent s'accumuler dans l'eau pressurisée. C'est pourquoi plusieurs circuits d'épuration sont implantés en parallèle sur la boucle de ce circuit primaire. Les paramètres principaux des spécifications chimiques EDF sont présentés ci-après (tableaux 5a, 5b).

Tableau 5b. Circuit primaire principal (Fonctionnement normal en puissance).

Paramètre	**Unité**	**VaIeur attendue**	**Valeur limite**
Bore	$mg.kg^{-1}$	0 à 2 500	
Lithium	$mg.kg^{-1}$	courbe de décroissance	
Oxygène	$mg.kg^{-1}$	< 0,010	< 0,10
Chlorure	$mg.kg^{-1}$	< 0,05	< 0,15
Fluorure	$mg.kg^{-1}$	< 0,05	< 0,15
Hydrogène	$mg.kg^{-1}$	25 à 35	25 à 50
Sodium	$mg.kg^{-1}$	< 0,1	< 0,2
Silice ionisée	$mg.kg^{-1}$		< 0,2

- **Circuit secondaire**

Les tableaux 6a, 6b, 6c représentent également les paramètres principaux des spécifications chimiques établies par EDF.

Tableau 6a. Eau d'appoint au circuit secondaire. (Eau déminéralisée conditionnée).

Paramètre	Unité	Valeur attendue	Valeur limite
pH à 25°C	$\mu g.kg^{-1}$		< 9,2
Sodium	$\mu g.kg^{-1}$	< 2	< 5
Conductivité cationique à 25 °C	$\mu S.cm^{-1}$	< 1	
Silice totale	$\mu g.kg^{-1}$	< 50	
Silice ionisée	$\mu g.kg^{-1}$		< 20
MES	$\mu g.kg^{-1}$	< 50	

Tableau 6b. Eau **d'alimentation des générateurs de vapeur** (Fonctionnement normal en puissance P > 25 % PN).

Conditionnement volatil		Morpholine		Ammoniaque		Paramètre
Paramètre	Unité	Valeur attendue	Valeur limite	Valeur attendue	Valeur limite	
pH à 25 °C			9,1 à 9,3		9,0 à 9,2	présence de cuivre
			9,1 à 9,7		9,6 à 9,8	absence de cuivre
Conductivité totale à 25 °C	$\mu S.cm^{-1}$	3 à 5		2,7 à 4,2		présence de cuivre
		3 à 13		10 à 17		absence de cuivre
Oxygène	$\mu g.kg^{-1}$		< 5		< 5	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 6c. APG - Purges des générateurs de vapeur (Fonctionnement à P > 25% PN)**.**

Paramètre	Unité	Valeur attendue	Valeur limite	Remarque	
Conductivité cationique à 25°C	µ S.cm^{-1}	< 0,6	< 1,0		
Sodium	µ g.kg^{-1}	< 5	< 20	eau de mer	alimentation condenseur
			< 10	eau de rivière	
pH à 25 °C		9,0 à 9,2	8,9 à 9,3	présence cuivre	morpholine
		9,0 à 9,6	8,9 à 9,7	absence cuivre	
		8,8 à 9,0	8,7 à 9,1	présence cuivre	ammoniaque
		9,4 à 9,7	9,3 à 9,8	absence cuivre	
Conductivité totale à 25 °C	µ S.cm^{-1}	2,5 à 5,0		présence cuivre	morpholine
		2,5 à 14		absence cuivre	
		1,8 à 2,6		présence cuivre	ammoniaque
		6,7 à 12		absence cuivre	
silice ionisée	Mg.kg^{-1}	< 1			
MES	Mg.kg^{-1}	< 1			

3.3. CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT

3.3.1. Constitution des circuits

La nature des appareils à refroidir est extrêmement variée

– condenseurs et échangeurs thermiques,

– réfrigérants d'huile, d'air, de gaz, de liquides, - moteurs, compresseurs,

– hauts-fourneaux, fours, laminoirs, coulées continues, convertisseurs, etc.,

– réacteurs chimiques.

Le comportement de ces appareils dépend:

- de leur type de construction (tubulaire, à plaques,...),

- du mode de circulation de l'eau (interne, externe, vitesse,...),

- des métaux en contact avec l'eau (acier, inox, cuivre et alliages, aluminium,...).

Les matériaux utilisés en contact avec l'eau (béton, bois) dans l'équipement auxiliaire du circuit doivent aussi être connus.

Trois cas peuvent se présenter (figure 19)

- l'eau chaude est rejetée en rivière ou à l'égout: c'est le **circuit ouvert**,

elle est refroidie par contact avec un fluide secondaire (air ou eau) et retourne sans contact avec l'air aux appareils à

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

refroidir: c'est le **circuit fermé**, - elle est refroidie par une évaporation partielle dans un réfrigérant atmosphérique, puis retourne aux appareils: c'est le circuit **semi-ouvert**

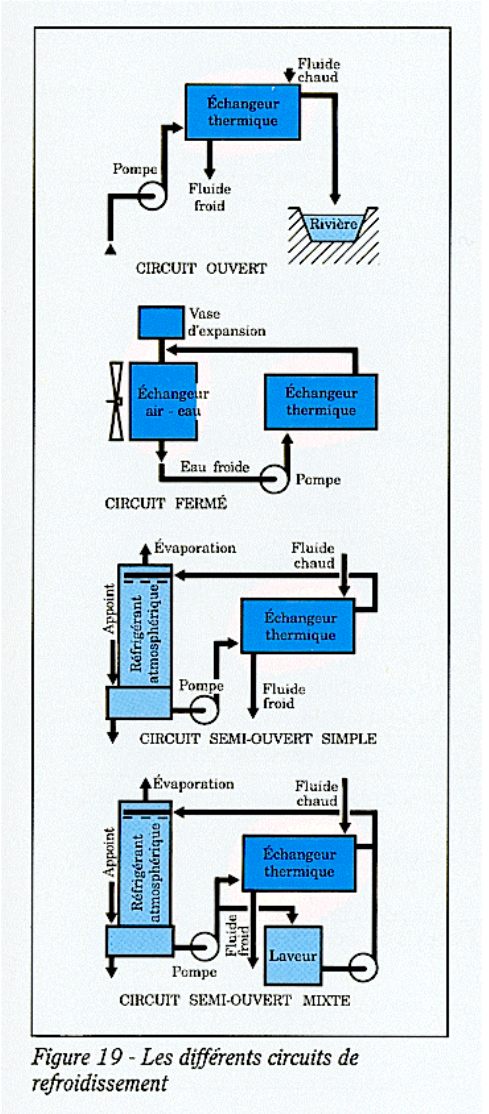


Figure 19 - Les différents circuits de refroidissement

Dans d'autres circuits semi-ouverts mixtes, l'eau peut avoir aussi un contact direct avec des éléments polluants provenant des procédés (par exemple, lavage de gaz), le conditionnement de l'eau est alors plus difficile.

Dans les circuits fermés, c'est-à-dire clos et sans évaporation, l'appoint d'eau est très faible et doit éventuellement satisfaire les normes de conductivité liées au procédé. On peut réaliser une protection totale et quasi définitive avec des inhibiteurs de corrosion. Les circuits semi-ouverts sont cependant les plus utilisés.

3.3.2. Circuits semi-ouverts

Les principaux paramètres qui caractérisent l'exploitation du circuit sont **V(m^3)** : volume d'eau total du circuit constitué par :

- le bassin des eaux chaudes,
- le bassin des eaux froides,
- les échangeurs de température,
- les canalisations de liaison, etc.

Q($m^3.h^{-1}$) : débit de circulation d'eau chaude retournée au réfrigérant

?T(°C) : différence entre les températures de l'eau entrant et sortant du réfrigérant

T max.(°C) : température du filin d'eau (température de "peau") au contact de la paroi la plus chaude du circuit.

W(kcal.h^{-1}) : puissance du réfrigérant atmosphérique; elle s'exprime par le produit des deux valeurs précédentes

$$W = 1000\ Q.\ ?T$$

E($m^3.h^{-1}$) : débit d'évaporation, c'est-à-dire la quantité d'eau évaporée pour produire le refroidissement du débit Q.

Ce débit d'évaporation est constitué par de l'eau pure qui n'entraîne aucun sel dissous. En admettant une chaleur latente de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Vaporisation de 560 thermies par m^3, on a la relation :

$$E = \frac{Q.\Delta T}{(560)}$$

Ev($m^3.h^{-1}$) : débit d'entraînement vésiculaire. C'est l'eau entraînée dans le courant d'air sous forme liquide. Il est donc constitué par une eau dont l'analyse est la même que celle de l'eau en circulation.

Les constructeurs s'attachent à réduire de plus en plus cet entraînement vésiculaire. Il se situe aujourd'hui autour de 0,05% Q avec des perspectives à 0,01%, mais en pratique, on considère souvent la relation suivante

$$Ev = 0,1\ \%\ Q$$

D($m^3.h^{-1}$) : débit de déconcentration totale, calculé pour maintenir une concentration maximale admissible en sels dissous. Pour éviter les précipitations on doit donc purger une partie P de l'eau en circulation, en plus de la perte d'eau E, telle que

$$P + E_v = D$$

A($m^3.h^{-1}$) : débit d'appoint.

Il doit compenser l'ensemble des pertes d'eau dans le circuit: évaporation et déconcentration totale.

$$A = E + D$$

t(h) : temps de résidence t au bout duquel la concentration d'un réactif injecté diminue de moitié, sous l'effet de la purge

$$t = \frac{V}{D} L_n 2 \simeq 0,7 \frac{V}{D}$$

C : taux de concentration. C'est le rapport des concentrations en sels dissous de l'eau du circuit et de l'eau d'appoint (voir page 46).

Quelques autres relations entre les précédentes valeurs peuvent être utiles. Si l'on désigne par s la salinité de l'eau d'appoint, par exemple, cette même salinité dans le circuit deviendra s x C. En établissant le bilan de l'égalité des quantités de sels entrant et sortant du circuit, on est conduit à la relation

3.3.3. Difficultés inhérentes aux circuits de refroidissement

Elles peuvent provenir

- des salissures,
- de l'entartrage,
- de la corrosion,
- des développements biologiques.

3.3.3.1. Salissures

Elles sont constituées par toutes les matières susceptibles de se déposer ou se former dans un circuit, à l'exclusion des tartres.

Types	Inconvénients directs
• Matières en suspension et colloïdes	Dépôts, érosion, surconsommation d'inhibiteur
- poussières atmosphériques - oxydes, limons et argiles - débris végétaux	Obstruction d'orifices
- algues et bactéries	Développement de mucilages
- champignons et levures	Attaque des bois
• Matières dissoutes - matières organiques - azote et phosphore	Développement d'algues et acidification
• Hydrocarbures (fuites)	Films

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ces salissures peuvent avoir plusieurs sources:
- l'eau d'appoint,
- l'air atmosphérique,
- les fabrications,

- **L'eau d'appoint**

Elle peut apporter :
- des matières grenues qu'il est possible de retenir par traitement approprié pour éviter leur dépôt aux points du circuit où la circulation est plus lente,
- des matières colloïdales instables: une faible élévation de température ou l'effet de concentration peuvent les précipiter à l'état de gel adhérent et adsorbant dont la couleur varie en fonction des matières fixées. Éliminer la plupart de ces matières, n'est en général envisageable que pour les circuits semi-ouverts concentrés.

- **.L'air atmosphérique**

Un réfrigérant atmosphérique est un excellent laveur d'air; tous les éléments véhiculés par l'air sont retenus par l'eau de circulation
- vents de sable (zones désertiques, aires de stockage de minerais),
- embruns riches en NaCl des zones littorales,
- poussières d'oxydes et de chaux en sidérurgie et cimenterie,
- HCl etSO_2 à proximité des fours d'incinération et de combustion,
- NH_4, et NH_4NO_3 dans les usines d'engrais.

Les gaz ou sels solubles modifient en permanence l'analyse chimique de l'eau en circulation, souvent de façon différente suivant la direction du vent Il faut donc connaître ces sources de pollution et leur proximité lors de l'étude du conditionnement d'un circuit, ne serait-ce que pour prévoir les équipements nécessaires à l'obtention d'une régulation plus rigoureuse (pH par exemple).

- **Les fabrications**

Deux cas doivent être distingués
- circuit semi-ouvert simple: la pollution est surtout accidentelle et provient de fuites d'huile, de fluides (solvants) et gaz refroidis (NH_3) dont il faudra éviter l'accumulation nocive dans le circuit (prévention, consignes, etc.),
- circuit semi-ouvert mixte : la pollution permanente provient de la seconde fonction de l'eau (lavage ou transport).

3.3.3.2. Entartrage

L'entartrage est la précipitation sur les surfaces métalliques de sels peu solubles de calcium, éventuellement de silice. Les principaux paramètres contrôlant la précipitation de ces tartres sont
- la température, dont l'élévation diminue en général la solubilité des sels concernés, - la concentration en ions,
- l'agitation.

- **Cas des sels de calcium**

Les principaux sels peu solubles rencontrés sont
- le carbonate, cause la plus fréquente de formation de tartres (voir page 273) que l'on peut redissoudre en service par voie chimique,
- le sulfate, dont la solubilité est maximale à 40 °C et qui peut précipiter à froid sous forme de gypse CaSO4, $2H_2O$ ou à chaud, sous forme anhydre ou hémihydrate (voir page 497). En circuit semi-ouvert il faut limiter le taux de concentration des eaux minéralisées et de l'eau de mer et, en particulier, lors de forts transferts thermiques.

Une fois formé, le sulfate de calcium ne se redissout que très lentement dans l'eau en circulation.
- l'orthophosphate $Ca_3(PO_4)_2$ dont le tartre, poudreux et peu adhérent à l'état pur, peut syncristalliser avec du carbonate de calcium en constituant un tartre dur.

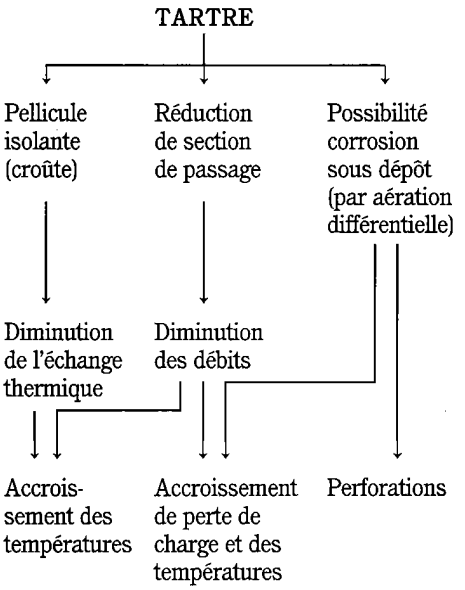
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Cas de la silice**

On doit ne pas oublier que la silice se trouve dans les eaux sous plusieurs formes
- SiO_2 ionisée,
- SiO_2 colloïdale,
- silico-aluminates de calcium ou de magnésium (argile).

La solubilité de la silice dépend du pH et de la température (voir page 497). Les tartres silicatés sont durs, fortement adhérents et isolants.

- **Inconvénients dus au tartre**



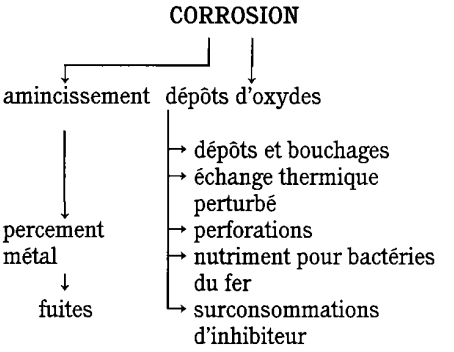
3.3.3.3. Corrosion

La corrosion est l'altération des différents métaux véhiculant l'eau. Les processus en sont décrits au chapitre 7. L'amincissement par corrosion uniforme dite acide est rarement rencontré. Le phénomène le plus fréquent est la formation de dépôts ou d'infractuosités (corrosion hétérogène ou par aération différentielle) qui peuvent entraîner des perforations.

Ces dépôts, par suite des différentes réactions anodiques et cathodiques en jeu, peuvent contenir une proportion importante de $CaCO_3$.

Les dépôts dus aux développements bactériens présentent une morphologie dite tuberculiforme, cause à la fois d'obstruction rapide et de perforations.

- **Inconvénients dus à la corrosion**



3.3.3.4. Les développements biologiques

Un circuit de refroidissement constitue un milieu privilégié pour le développement des organismes vivants. On y trouve air, chaleur et lumière, et il faut, soit éviter tout apport de nutriments rapidement assimilables ou de composés organiques à forte biodégradabilité, soit prévoir un traitement bactériostatique.

En sus des problèmes d'obstruction, la formation progressive d'un film isolant par encrassement biologique (Fouling) diminue les coefficients d'échange et accroît les pertes de charge. Elle entraîne à plus long terme le développement de corrosions sous dépôt pouvant entraîner des fuites.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3.4. Quantités d'eau mises en oeuvre

3.3.4.1. Refroidissement de condenseurs de centrales électriques

a) Débits de circulation

- Centrale thermique conventionnelle à pleine charge (600 MW):

- à grande vitesse de circulation
  (?T= 8,7°C) : 20-21 $m^3.s^{-1}$

- à petite vitesse de circulation
  (?T = 12°C) : 14-15 $m^3.s^{-1}$

- Centrale nucléaire à pleine charge (1200 MW):
  (?T = 12°6) : 47-48 m^3s^{-1}

b) Appoints en circuits semi-ouverts

Avec un taux de concentration de 3 à 4 et suivant l'hygrométrie de l'air

- centrale thermique 1,2 à 2 $m^3.h^{-1}$ par MW.
- centrale nucléaire 2,2 à 3 $m^3.h^{-1}$ par MW.

3.3.4.2. Refroidissements divers dans l'industrie

Des ordres de grandeur de volumes en circulation peuvent être donnés pour quelques procédés (hors lavage de gaz)

Usines d'engrais	
NH^3	250 à 350 m^3 part
Urée	65 à 100 m^3 part NH_4NO_3
	80 à 100 m3 par t
méthanol (ex produits pétroliers)	100 à 250 m^3 par t
cokeries	30 à 40 m^3 part t de coke
hauts fourneaux	20 à 30 m^3 par t de fonte
convertisseurs	2-3 à 10 m^3 par t acier,
	selon ou non production de vapeur
coulée continue	10 à 25 m^3 part acier
trains à bande	30 à 50 m^3 part acier
trains à fil	5 à 10 m^3 part acier

Lorsqu'il n'y a pas de température froide très basse imposée, le refroidissement par échangeur aérotherme peut se substituer à la réfrigération atmosphérique et diminuer les appoints.

3.4. EAUX DE FABRICATION

Les besoins en eau de chaudière et en eau de refroidissement sont communs à la majeure partie des industries et on a vu qu'ils pouvaient être définis par des recommandations interprofessionnelles très précises. En eau de fabrication, ces besoins ne font l'objet de recommandations que pour quelques industries.

3.4.1. Eaux de brasseries et boissons gazeuses

3.4.1.1. Brasseries

- **Utilisations**

- préparation de la bière,
- lavage des cuves, appareils et sols,
- refroidissement,
- éventuellement nettoyage des bouteilles.

- **Qualité des eaux d'appoint**

Elles font l'objet de recommandations

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

professionnelles très dépendantes des qualités de bières élaborées. Ainsi les bicarbonates qui précipiteraient lors de l'introduction du malt riche en phosphate de calcium sont à éviter en brassage.

On peut en première approche retenir les règles suivantes

- élimination systématique des bicarbonates,
- concentration en Mg aussi faible que possible (< 10 $mg.l^{-1}$),
- rapport SO_4/Cl supérieur à 1 (moelleux des bières),
- concentration en Na < 100 $mg.l^{-1}$ pour minimiser l'âcreté,
- NO_3 < 50 $mg.l^{-1}$ et NO_2 < 1 $Mg.l^{-1}$ (limites de toxicité en fermentation et de potabilité).

Des exemples particuliers de compositions minérales de bières peuvent être cités

Concentration $mg.l^{-1}$	Pale Ale Burton	**Bières blondes**		**Bières brunes**
		Légères	Fortes	Munich
		Pilsen	Dortmund	
Na + K	15-30	0	20	10
Mg	80	1	24	20
Ca	370	7	260	70
Cl	34	3	107	2
$S0_4$	895	3	290	18
Résidu sec	1800	51	1100	270

. **Quantités mises en œuvre**

5 à 6 hl par hl bière, réductibles à 4 à 5 par recyclage :

- préparation de la bière: 1,5
- lavages: 3 à 4
- refroidissement: 1 à 2

3.4.1.2. Boissons gazeuses

Systématiquement les eaux de préparation des boissons doivent satisfaire les normes d'eau potable.

Bien que les fabricants définissent souvent eux-mêmes la chaîne de traitement, notamment les temps de séjour, on peut noter une tendance récente à demander des qualités spécifiques de l'eau. Parmi celles-ci, on peut rechercher le maintien d'un TAC inférieur à 5 °F et une salinité totale inférieure à 500 $mg.l^{-1}$. Pour les utilisations de l'eau en nettoyage, on peut par contre demander un excès de chlore résiduel de plusieurs $mg.l^{-1}$.

La consommation est de 31 d'eau pour 1 l de boisson.

3.4.2. Industries laitières

L'eau est utilisée pour :

- désinfection des appareils et cuves,
- nettoyage des sols,
- lavage des produits,
- reconstitution de lait,
- refroidissement.

Les utilisations diverses d'eau représentent 4,5 à 8 1 par litre de lait..

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.4.3. Sucreries et raffineries de sucre

3.4.3.1. Sucreries de betteraves

Les techniques de traitement d'eaux industrielles interviennent dans l'épuration de l'eau d'appoint et du jus lui-même.

- **lavage des betteraves**: recyclage des eaux polluées sur des décanteurs raclés, de façon à récupérer l'eau,
- .**diffusion des cossettes** (préparation du jus brut) : traitement des eaux condensées ammoniacales recyclables en tête de diffusion,
- **traitement des jus légers**

- décalcification des jus de deuxième carbonatation (protection contre le tartre des appareils d'évaporation),
- déminéralisation des jus (réduction du taux de mélasse),
- décoloration des sirops sur charbon actif ou résines adsorbantes.

- **concentration des jus, cristallisation du sucre**

- conditionnement des jus dans les évaporateurs.
- **traitement des bas produits** (égouts ou mélasses) en vue de réduire le taux de sucre-mélasse

- traitement des égouts sur résine cationique régénérée au chlorure de magnésium (procédé Quentin). Le remplacement des ions Na et K par Mg réduit le sucre retenu dans la mélasse,
- déminéralisation des égouts ou mélasses par échange d'ions, avec traitement complémentaire éventuel pour l'obtention de sucre liquide.

- **eaux d'appoint**

- appoint aux chaudières à l'ouverture de la campagne ou en cas d'insuffisance accidentelle des retours de condensats,
- appoint permanent au circuit de refroidissement des turbo-alternateurs et à la réception des betteraves (5 à 10 l par tonne de betteraves).

La sucrerie a en effet un cycle excédentaire: l'eau est apportée par la betterave et purgée avec les eaux ou les boues de lavage (figure 20).

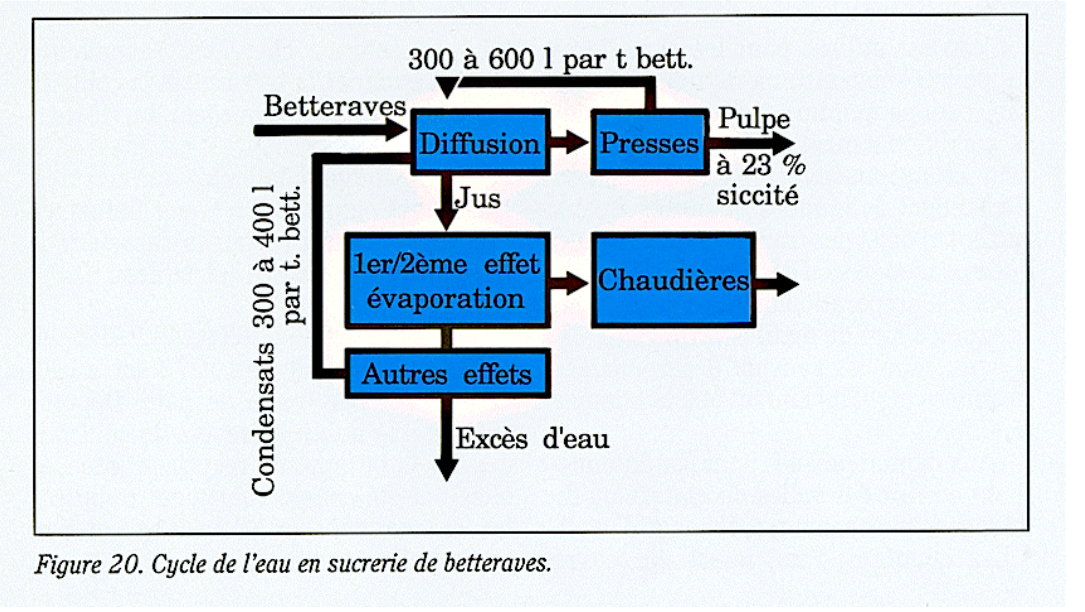


Figure 20. Cycle de l'eau en sucrerie de betteraves.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.4.3.2. Sucreries de canne

La purification des jus bruts requiert représenter 80 % des besoins totaux et se des méthodes de clarification analogues répartissent comme suità celles de l'eau :

- décantation accélérée des jus déféqués à la chaux,
- flottation des jus épurés en vue de séparer les "folles bagasses",
- désinfection des circuits (essentielle).

3.4.3.3. Raffineries de sucre (betteraves ou canne

Les sirops de refonte et les sucres liquides doivent subir des traitements de décoloration plus ou moins complets.

3.4.4. Conserveries de légumes et de fruits

Un adoucissement partiel des eaux de fabrication est souvent nécessaire (duretés de 10°F à 20°F pour les fruits). En outre, une réduction de la salinité totale peut s'avérer utile.

3.4.5. Industries textiles

L'eau est utilisée pour les chaudières (appoints souvent importants), pour les fabrications (teintures, rinçages) et pour le conditionnement de l'air (humidification et dépoussiérage). Ces industries demandent de grandes quantités d'eaux qui sont l'objet des traitements suivants

- eaux adoucies ou déminéralisées destinées à la préparation du fil, spécialement lorsqu'il s'agit de textiles artificiels,
- eaux adoucies souvent décarbonatées destinées au blanchiment et à la teinture des fibres,
- eaux déminéralisées pour conditionnement de l'air des salles de filature ou de tissage (osmose inverse, échange d'ions).

Les quantités d'eau mises en couvre peuvent, pour les seules fabrications, représenter 80% des besoins totaux et se répartissent comme suit

	m^3 par t produit fini
dégraissage laine	20-40
finition et teinture de laine	70 à 200
finition coton et tissus synthétiques	100
teinture et impression de tricots	70

3.4.6. Pâtes à papier et papeteries

Ces industries (voir page 98) ont de grosses consommations d'eau pour les besoins suivants

- production de vapeur,
- préparation des pâtes,
- élaboration du papier et transport des fibres.

3.4.6.1. Qualité des eaux

Les papeteries cherchent essentiellement à éliminer la turbidité et la couleur des eaux brutes ainsi que leur dureté temporaire.

Des recommandations américaines (National Council of the Paper Industry) préconisent aussi certaines caractéristiques suivant les pâtes (cf tableau 7).

3.4.6.2. Consommations d'eau d'appoint

Elles se situaient vers 1975 entre 100 et 300 m^3 par tonne de pâte. Depuis, grâce à une politique sévère de contrôle des rejets et donc de recyclage intense, elles ont été considérablement réduites, les circulations spécifiques par atelier restant elles-mêmes élevées :

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 7 - Recommandations NCPI pour les eaux de papeteries

Caractéristiques	Concentration limite dans l'eau de fabrication			
	papiers fins	papier kraft		papiers à base de pâte mécanique
		blanchi	écru	
Turbidité (mg. l^{-1} de SiO_2)	10	40	100	50
Couleur (mg. 1^{-1} de Platine/ Cobalt)	5	25	100	30
TH (°F)	10	10	20	20
TCa (°F)	5	-	-	-
TA (°F)	7,5	7,5	15	15
Fe (mg.1^{-1})	0,1	0,2	1,0	0,3
Mn (mg.l^{-1})	0,05	0,1	0,5	0,1
Chlore résiduel (mg.l^{-1})	2,0	-	-	-
Silice soluble (mg.l^{-1})	20.	50	100	50
Matières solides dissoutes (mg.1^{-1})	200	300	500	500
CO_2 libre (mg.l^{-1})	10	10	10	10
Chlorures (mg.l^{-1})	-	-	-	75

Usines	m^3 par t
Fabrication de pâtes	
- kraft écru	25 à 60
- kraft blanchi	40 à 80
- sulfite blanchi	80 à 150
- semi-chimique	12 à 20
- CTMP	50 à 80
Désencrage	
Fabrication de papier	
- papier kraft	20 à 40
- papier impression journal	40 à 60
- papier fin	40 à 100
- carton/emballage	3 à 40

3.4.7. Récupération secondaire de pétrole

Les exigences suivantes doivent être satisfaites

- non-colmatage de la roche - réservoir,
- non-corrosion du forage (Tubing),
- absence de développements bactériens,
- compatibilité chimique avec l'eau du réservoir.

Selon la perméabilité du réservoir, la température et la charge de l'eau en MES, les critères de traitement suivants sont fréquemment souhaités:

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

M.E.S	94 à 97 % d'élimination des particules de 0 > 2 µm ou teneurs finales de 0,5 à 1 $mg.l^{-1}$
Teneur en Oz à partir	
- d'eaux froides 80 $\mu g.1^{-1}$ à 10 $\mu g.l^{-1}$	
- d'eaux tièdes (30°C) < 10 $\mu g.l^{-1}$ O_2	

3.4.8. Sidérurgie

Grosse consommatrice d'eau, cette industrie a depuis longtemps réalis é des circuits semi-ouverts adaptés aux conditions de travail spécifiques rencontrées (voir page 63).

Il faut distinguer deux grandes utilisations de l'eau dans cette industrie :

- le refroidissement indirect par des échangeurs très divers et souvent soumis à des températures de l'eau élevées, nécessitant quelquefois des circuits fermés. Les eaux d'appoint selon les cas seront décarbonatées ou déminéralisées,

- le refroidissement direct, soit en lavage de gaz, soit en granulation de produits ou en décalaminage, dans lesquels l'eau se salit et doit être constamment traitée dans le circuit. La qualité de l'eau d'appoint importe alors beaucoup moins.

- **Cokerie**

- Condensation primaire indirecte des gaz ou finale directe.

- Dépoussiérage humide des gaz à l'enfournement du charbon préchauffé.

- Dépoussiérage humide des fumées au défournement du coke.

- **Hauts fourneaux**

- Refroidissement des organes de hauts fourneaux tels que tuyères, tympes et boites à vent.

- Extinction du laitier, en rigole, en pot, en tambours ou sur lits filtrants avec des circulations d'eau de 10 à 4 m^3 par tonne.

- Lavage des gaz de hauts fourneaux.

- **Réduction directe**

Ce procédé récent est très gros consommateur d'eau :

- Lavage et refroidissement des gaz de réduction ou des éponges de fer. Les volumes d'eau mis en oeuvre (12 à 30 m^3 par tonne d'éponge) sont plus élevés qu'en hauts fourneaux et, en raison de la température élevée des gaz, ces eaux sortent très chaudes des laveurs (50 à 70 °C).

- Refroidissement de la machinerie (compresseurs et réfrigérants à huile) et refroidissement des gaz. Une consommation notable d'eau déminéralisée est requise pour la production de vapeur de reformage du gaz de procédé.

- **Convertisseurs**

L'utilisation prépondérante des procédés L.D., LWS, LDAC ou BOS nécessite des circuits importants

- refroidissement de la hotte et de la lance (quelquefois assuré par vaporisation),

- Lavage du gaz: récupération de calories par combustion partielle du gaz et vaporisation en chaudière B.P. Des appoints d'eau déminéralisée sont alors nécessaires.

- **Fours électriques et métallurgie en poche**

La production d'aciers fins, est réalisée dans des fours électriques à arc (techniques UHP et autres) ou en poches (STEP), réchauffées par induction ou par arc; elle peut être complétée par un dégazage sous vide de lacier. L'eau intervient de trois façons :

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- refroidissement normal des fours et des poches,
- production de vapeur pour les éjecteurs de mise sous vide,
- refroidissement des lingotières et des électrodes à partir d'eau déminéralisée.

- **Coulées continues de brames et billettes**

Trois circuits sont usuels

- refroidissement de la lingotière en circuit fermé avec appoint d'eau déminéralisée,
- refroidissement de la machine, en circuit semi-ouvert, avec conditionnement inhibiteur soigné,
- aspersion de la machine et de la brame ou des billettes, avec production de battitures de décalaminage et de laitier d'oxycoupage.

- **Trains de laminage à chaud**

Il faut alimenter deux types de circuits

-refroidissement indirect de fours, compresseurs, moteurs, etc.,

-refroidissement direct pouvant assurer trois fonctions: refroidissement du métal, refroidissement des cages de laminage, décalaminage de l'acier.

Les circuits de décalaminage sont destinés à l'enlèvement préalable d'oxydes divers (wurtzite, hématite) par érosion hydraulique. L'eau se charge alors de paillettes fines ou battitures, plus ou moins nombreuses et plus ou moins unes suivant le type du train et la dureté de l'acier.

Les trains de laminage sont très variés :

a) Trains à bande

Les plus importants traitent 200 à 500 $t.h^{-1}$ d'acier sous forme de brames.

Débits de circulation mis en jeu

- refroidissement direct : 10 à 20 000 $m^3 \cdot h^{-1}$
- refroidissement indirect : 20 à 30 000 $m^3 \cdot h^{-1}$

Des circuits de refroidissement séparés équipent les moteurs, les cuves à huile et les fours de réchauffage.

Ils sont souvent complétés par :

- l'écriquage automatique, générateur de grandes quantités de laitier granulé,
- le refroidissement de brames, en piscine, en tunnel ou sous aspersion, qui met en oeuvre de grands débits, sans créer de fortes pollutions.

b) Autres trains à chaud

- Trains à tôles plates ou trains quartos.
- Blooming-slabbing.
- Trains à profilés, à poutrelles, à fers marchands.
- Trains à ronds ou à fil.
- Laminoirs de tubes.

- **Laminoirs à froid**

L'élaboration de produits laminés de faible épaisseur et d'acier galvanisé nécessite des prétraitements du métal tels que le dégraissage et surtout le décapage. Ce dernier est réalisé à l'acide sulfurique et de plus en plus fréquemment à l'acide chlorhydrique régénéré in situ.

Des installations de déminéralisation en circuit ouvert ou en circuit fermé sont nécessaires pour l'alimentation des rinçages finaux des ateliers de zingage ou d'étamage. Une eau très pure et adoucie est également requise pour la préparation des bains d'huiles solubles.

3.4.9. Métallurgie du cuivre

- **L'élaboration du métal** peut se faire par voie sèche ou par voie humide suivant la nature des minerais. Les procédés hydrométallurgiques qui utilisent le plus

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

souvent une lixiviation à l'acide sulfurique et une électrolyse, sont de plus en plus fréquents, car ils permettent de traiter les minerais pauvres ou les résidus de flottation.

Le laminage du cuivre, à partir des wirebars, assure la production de profilés, de câbles ou de fils.

Les opérations de dégrossissage mettent en oeuvre un décalaminage hydraulique de la surface du métal et provoquent la mise en suspension dans l'eau d'oxydes de cuivre, produits valorisables souvent intéressants à récupérer. Les conditions d'exploitation des circuits de décalaminage et de refroidissement sont analogues à celles de la sidérurgie.

3.4.10. Les industries automobile et aéronautique

L'industrie automobile comprend des usines de construction de moteurs et de boites de vitesse, des usines de carrosserie et de montage, et de nombreux ateliers de sous-traitance souvent indépendants. Les besoins en eau d'appoint sont donc très différents suivant les situations.

Néanmoins, trois familles peuvent être distinguées

- refroidissement, principalement de compresseurs et de conditionneurs d'air,
- préparation de bains divers d'électroplastie et de peintures nécessitant en général de l'eau déminéralisée,
- alimentation des centrales d'usinage et rectification en eau peu minéralisée ou adoucie.

La définition des différents ateliers concernés est donnée page 110.

L'industrie aéronautique présente beaucoup de besoins similaires.

3.4.11. Fabrications avec emploi d'eau ultra pure

Elles concernent la production de semi-conducteurs et comportent la préparation de l'eau d'appoint ultra-pure et son affinage dans les boucles de distribution.

Qualité de l'eau d'appoint

L'accroissement récent de capacité des mémoires de quelques K-Bits à 256 K – Bits sinon 1 M -bits impose des exigences de plus en plus sévères pour la qualité de l'eau ultra-pure utilisée au rinçage des composants, en particulier pour les paramètres physiques et biologiques.

On peut citer les recommandations ASPEC 86/17 (Association pour la Prévention et l'Etude de la Contamination) du tableau 8.

Une boucle en matériaux plastiques et généralement équipée d'un réservoir de stockage assure l'alimentation des postes d'utilisation en maintenant une vitesse de circulation relativement constante.

3.4.12. Fabrication du chlore

Elle repose sur l'électrolyse de saumures saturées en Na Cl et dont la qualité dépend des procédés (cellules à diaphragmes et à mercure). L'épuration de ces saumures est réalisée soit sur l'appoint, soit en circuit fermé. Les éléments à éliminer sont prioritairement Ca^{2+} Mg^{2+} ; Fe^{2+}, éventuellement SO_4^{2-} et, en recyclage, Hg^{2+}.

Pour les cellules à diaphragme, on cherche à maintenir $Ca^{2+} + Mg^{2+} < 5$ mg.l^{-1}.

Le développement de cellules à membranes et l'accroissement des densités de courant à 7 000 A.m-2 exigent une élimination plus complète du calcium et des matières organiques. Un affinage complémentaire après l'épuration chimique peut devoir satisfaire les spécifications suivantes:

- $Ca^{2+} < 50$ µg.l^{-1}
- MES< 1 µg.l^{-1}

et éventuellement: - $Sr^{2+} < 50$ µg.l^{-1}

Le dégazage de l'excès de chlore et la réduction des iodates éventuels peuvent

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau **8. Eaux ultra-pures pour l'industrie électronique**
(Circuits intégrés et surfaces sensibles).

		Niveau	Niveau	Niveau
		Technique) 1	Technique 2	Technique 3
Résistivité		Supérieur à 18 MO cm, à 25 °C		
pH		6,5 à 7,5		
Température		20 °C ± 1°C		
Résidu d'évaporation (maxi, $mg.l^{-1}$)		1	0,5	0,25
Silicium (Si) (maxi, $mg.l^{-1}$)		0,02	0,02	0,01
Sodium (Na) (maxi, $mg.l^{-1}$)		0,01	0,01	0,005
Impuretés métalliques et métalloïdiques, chaque impureté(maxi, $mg.l^{-1}$)		0,05	0,05	0,01
Matières organiques (COT) (maxi, $mg.l^{-1}$)		1	0,25	0,05
Contamination particulaire maxi	membrane	classe 0 (NAS 1638)	–	–
	compteur optique	10 000 par l Ø = 0,5 µm	1000 par l Ø = 0,5 µm	100 par l Ø = 0,5 µm
Micro-organismes(en nombre de colonies par 100 ml)	37°C/24 h	40	10	1
	22°C/72 h	300	30	3

aussi être nécessaires sur le circuit après électrolyseurs.

3.4.13. Hydrométallurgie

Cette industrie concerne en particulier l'extraction de l'uranium, de l'or, de l'aluminium et utilise les procédés élémentaires suivants :

- extraction du métal par attaque acide ou alcaline (lixiviation),
- - séparation solide/liquide : filtration ou décantation,
- -concentration des métaux: extraction par solvants ou par échangeurs d'ions,
- -précipitations diverses.

Ces procédés ont pour avantage d'être effectués à froid et de maîtriser les problèmes

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de corrosion. Les techniques employées sont souvent proches de celles du traitement des eaux et peuvent ainsi bénéficier de l'expérience acquise dans ce domaine. Les paramètres les plus significatifs, en particulier pour la clarification des liqueurs, sont

- **MES:** après décantation, les liqueurs contiennent encore fréquemment 100 à 200 $mg.l^{-1}$ de MES, parfois plusieurs $g.l^{-1}$. Ces matières résiduelles sont gênantes aussi bien dans le cas d'une extraction directe du métal que dans celui d'une purification par solvant organique ou par résines. Beaucoup d'utilisateurs souhaitent en réduire la teneur à moins de 10 à 2 0 $mg.l^{-1}$.

Silice colloïdale: la silice est présente dans les eaux sous forme ionisée (acide silicique ou acide fluosilicique) à des concentrations maximales possibles de 200 à 500 $mg.l^{-1}$ ou sous forme de gel d'acide polysilicique peu ionisé. Cette dispersion colloïdale est électropositive, donc non coagulable mais relativement adsorbable.

Cette silice peut précipiter sur les résines ou en présence de solvants.

- **Sulfate de calcium:** les minerais calcaires et dolomitiques traités par l'acide sulfurique donnent naissance à des liqueurs sursaturées en $CaSO_4$ cause d'entartrage et de précipitation. On doit briser les sursaturations lors des neutralisations à la chaux ou les prévenir.
- **Matières organiques:** elles sont nuisibles dans deux cas

- en extraction liquide-liquide, le solvant résiduel nuit à la précipitation du métal, surtout en électrolyse,
- en fixation sur charbon; certaines matières organiques adsorbées peuvent ne pas être éluées à la régénération chimique. D'autres forment avec le métal un complexe non adsorbable.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. LES EFFLUENTS URBAINS

4.1. ORIGINE ET MODE DE COLLECTE

Les effluents urbains comprennent

- les eaux **résiduaires** ou eaux **usées**
- les eaux **pluviales**.

L'origine des eaux résiduaires urbaines (ERU) est principalement domestique (eaux vannes, eaux "grises"); la part d'origine industrielle est généralement croissante avec la taille de l'agglomération.

Les établissements industriels qui rejettent une pollution proportionnellement trop importante ou exigeant un traitement spécifique sont généralement dotés d'un système d'épuration autonome. Suivant le niveau de ce traitement, l'effluent industriel rejoint ensuite le milieu récepteur ou le système de collecte et de traitement des ERU.

Conventionnellement, les volumes et pollutions journaliers des effluents industriels sont fréquemment estimés en équivalents habitants correspondant aux valeurs prises par habitant pour les eaux usées domestiques (voir pages 74 et 76).

L'assainissement englobe collecte, transport et traitement des effluents urbains.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 21.

Les deux principaux systèmes de collecte utilisés en assainissement sont des systèmes à fonctionnement continu

- le système **unitaire** qui reçoit dans les mêmes canalisations les eaux usées et les eaux pluviales,
- le système **séparatif** comportant deux réseaux de canalisations différents, l'un pour les eaux pluviales de dimensions comparables à celles d'un réseau unitaire et l'autre pour les eaux usées proprement dites, de dimensions plus réduites.

Les premiers réseaux d'assainissement ont été de type unitaire; le développement des réseaux séparatifs est plus récent. Les systèmes de collecte rencontrés dans les agglomérations sont rarement totalement homogènes.

On appelle système **pseudo-séparatif** un système séparatif dans lequel les eaux de toiture et de cours intérieures sont dirigées vers le réseau d'eaux usées.

Les réseaux unitaires sont équipés de déversoirs d'orage, conduisant au rejet direct en rivière d'une partie du débit par temps de pluie. Seule une partie plus ou moins importante du flux de pollution atteint alors la station d'épuration. Ce rejet de pollution en rivière par temps de pluie constitue, avec le mauvais auto curage des canalisations par temps sec, les deux inconvénients principaux des réseaux unitaires. Leur bonne réalisation est par contre plus aisément contrôlable. Une qualité essentielle d'un réseau est d'être étanche et de ne pas permettre l'intrusion d'eaux parasites venant de la nappe ou de ruissellements de surface.

Le transport des effluents est réalisé dans toute la mesure du possible par voie gravitaire; cependant les conditions topographiques exigent fréquemment la mise en place de stations de relèvement intermédiaires pouvant être suivies de collecteurs sous pression de longueur appréciable. Dans des cas exceptionnels la collecte de l'effluent au point d'émission peut être faite sous pression ou même sous vide ces techniques envisagées sur des aménagements de faible importance permettent de remonter la cote de pose des canalisations.

Deux modes d'assainissement, ne mettant pas en oeuvre de réseau de canalisations collectif sont aussi à signaler

- l'assainissement **individuel** ou **regroupé appliqué** à une habitation ou à quelques habitations très proches, sou-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

vent appelé assainissement autonome. Les eaux usées domestiques sont directement déversées dans un dispositif d'épuration "rejetant" normalement dans le sol (le plus souvent fosse septique et épandage souterrain - figure 22).

- le traitement des **matières de vidange** en station centralisée. Ce mode d'assainissement consiste à stocker dans chaque habitation les effluents les plus concentrés dans des fosses étanches dont le contenu est régulièrement évacué par "tonne de vidange" vers une station centrale de traitement. I est encore en usage dans certaines régions où l'ancienneté de l'habitat et/ou la platitude du relief contrarient la réalisation de réseaux de collecte. Il est parfois appliqué aux produits de curage de fosses septiques. Dans les pays asiatiques, ce type de collecte et de traitement des matières de vidange ("night soils") reste encore développé. Le retard de construction des réseaux y est souvent dû à la très forte densité de population.

A signaler enfin, toujours en Asie, dans certains pays la pratique ancestrale d'emploi direct en culture des matières fécales. Les eaux usées collectées dans un réseau d'assainissement peuvent alors présenter une concentration relativement faible malgré une consommation d'eau réduite.

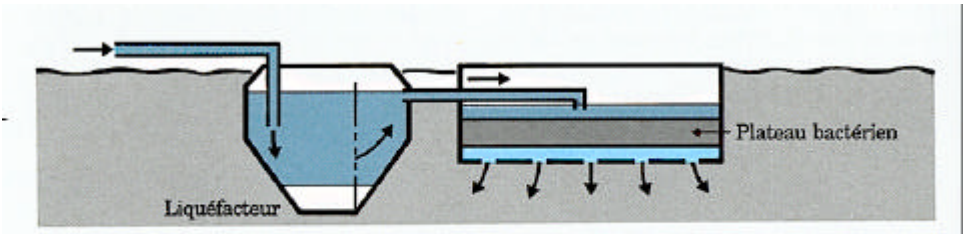


Figure 22. Fosse septique et épandage souterrain.

4.2. QUANTITÉS A TRAITER

4.2.1. Eaux usées

Le volume d'eaux usées rejeté par habitant par jour va généralement croissant avec la taille de l'agglomération par suite de certaines différences d'habitudes de vie et d'une plus grande activité des secteurs secondaire et tertiaire. Il varie aussi suivant les régions du globe et leur niveau de développement. Il peut être influencé par le mode de tarification de la consommation d'eau potable.

Inférieure à 150 l/hab.j dans de nombreuses agglomérations rurales, la production d'eaux usées urbaines par temps sec est aujourd'hui en France d'environ 200 l/hab.j, pour des villes de quelques dizaines de milliers d'habitants. Elle est supérieure à 300 l/hab.j, à Paris où les quantités d'eau de lavage des rues sont importantes. Elle dépasse nettement 400 l/hab.j dans de très nombreuses villes américaines ou suisses. Le captage fréquent dans des réseaux unitaires de petits ruisseaux collecteurs d'eaux pluviales conduit à l'inflation de ces ratios.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'introduction non contrôlée très fréquente d'eaux parasites a le même effet

Ces pratiques sont coûteuses car le dimensionnement des stations dépuration est très dépendant de leur capacité hydraulique.

La production d'eaux usées urbaines varie tout au long de la journée. Dans les petites agglomérations on constate deux pointes de débit; dans les agglomérations plus importantes on n'en constate qu'une. L'évolution sociologique conduit à la généralisation de ce dernier type de variation (voir figure 23). Plus le réseau est court et la population desservie faible, plus la pointe est importante. La présence de nombreux postes de relèvement sur un réseau peut avoir un effet comparable.

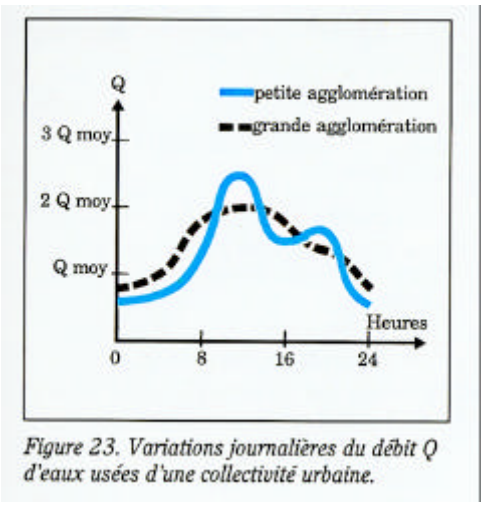


Figure 23. Variations journalières du débit Q d'eaux usées d'une collectivité urbaine.

Dans de nombreux pays, on définit par temps sec un débit moyen diurne Qd. Si Qj est le débit journalier, Qd est le plus souvent compris entre

$$\frac{Qj}{14} \text{ et } \frac{Qj}{18}$$

Le débit de pointe de temps sec Qp en réseau séparatif peut être approché par la formule

$$Qp = Qm\ (1{,}5 + \frac{2{,}5}{\sqrt{Qm}}) \text{ en l.s}^{-1}$$

avec Qm = débit moyen journalier =

$$\frac{Qj \text{ (en l)}}{86\,400}$$

et dans la limite d'un coefficient de pointe

$$\frac{Qp}{Qm} \leqslant 3$$

En dehors des variations journalières on note de plus en plus des variations saisonnières importantes du débit d'eaux usées, y compris dans les très grandes agglomérations. Ces variations, étroitement liées aux périodes de vacances traduisent un exode important des citadins vers les centres de loisirs. Dans les pays à niveau de vie très élevé, de nombreux citadins quittent leur résidence habituelle à l'époque des sports d'hiver ainsi que durant l'été: ils utilisent donc, chaque année, trois systèmes d'assainissement différents. Cela n'est pas sans conséquence sur les besoins en équipements collectifs.

4.2.2. Eaux pluviales

Le débit d'eaux pluviales dépend

- de la pente et de la surface du bassin versant,
- de son coefficient d'imperméabilisation,
- de la pluviosité.

Différentes formules sont proposées dont celle de Caquot

Pour les zones urbaines européennes de quelques centaines d'hectares, l'ordre de grandeur du débit de ruissellement maximal quinquennal est de 200 l/s.ha.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.3. ESTIMATION DE LA POLLUTION

4.3.1. MES

Les charges en matières solides apportées par les eaux brutes par habitant et par jour peuvent être estimées, en première approximation, à

- réseau séparatif : 60 à 80 g dont environ 70 % de matières volatiles,
- réseau unitaire: 70 à 90 g dont environ 65 % de matières volatiles.

La pollution rejetée par habitant croît avec le niveau de vie et généralement avec la taille des agglomérations mais cette croissance est moins rapide que celle du volume rejeté de sorte que les eaux usées collectées ont tendance à devenir plus diluées. Une mauvaise exécution des réseaux favorisant l'arrivée d'eaux parasites aggrave cette tendance.

Les apports de MES précédemment indiqués s'entendent après dégrillage et dessablage de l'effluent brut et ne tiennent pas compte des produits recueillis au prétraitement qui sont de l'ordre de :

dégrillage

- 2 à 5 dm^3 de matières dégrillées par an par habitant pour un dégrillage à espacement de 40 mm environ,
- 5 à 10 dm^3 pour un dégrillage à 20 mm, - 10-15 dm^3 pour un dégrillage à 6 mm.

La teneur en eau de ces matières est de 70 à 80% après égouttage et pressage.

dessablage:

En réseau unitaire environ 12 dm^3 part an par habitant pour une urbanisation de type pavillonnaire, et 5 dm^3 pour une urbanisation à habitat collectif

- **Eaux pluviales**

Une estimation de la pollution apportée par les seules eaux pluviales est intéressante à connaître. Une règle générale est difficile à établir car les enquêtes approfondies en la matière sont encore peu nombreuses et l'influence des conditions locales est très forte. Cette pollution varie considérablement au cours de la précipitation: la concentration est généralement la plus forte au début d'un orage. Les matières entraînées de caractère normalement plus minéral que celles des eaux usées contiennent cependant des hydrocarbures; le plomb en provenance des carburants est aussi fréquemment présent

Une enquête effectuée par le Service Technique de l'Urbanisme français (S.T.U.) conduit à une estimation du flux polluant annuel de 300 à 1100 kg MES par hectare de bassin versant et de 800 à 2650 kg MES par hectare de bassin versant imperméabilisé.

4.3.2. Pollution organique carbonée

Les charges en DBO apportées dans les eaux usées urbaines par habitant et par jour peuvent être estimées, après prétraitement, à :

- réseau séparatif : 50 à 70 g,
- réseau unitaire: 60 à 80 g.

Environ 1/3 de cette pollution est dissous, les 2/3 restants sont liés aux particules (décantables ou pas). En réseaux unitaires le pourcentage de la pollution organique décantable est, en général, plus fort qu'en réseaux séparatifs.

Le rapport $\frac{DCO}{DBO_5}$ des ERU est le plus souvent compris entre 2 et 2,5.

Le COT,du fait des techniques d'analyse, prend difficilement en compte la pollution particulaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Eaux pluviales**

L'enquête S.T.U. signalée plus haut propose l'estimation suivante du flux polluant annuel des eaux pluviales

	Bassin versant	**Bassin versant imperméabilisé**
DBO kg par hab.	30-85	80-210
DCO kg par hab.	160-460	470-1100

4.3.3. Autres composants

- **Azote**

Dans les eaux usées domestiques la concentration en NTK est de l'ordre de 15 à 20 % de celle de la DBO_5. L'apport journalier de NTK est compris entre 10 et 15 g par habitant.

- **Phosphore**

L'apport journalier de phosphore est d'environ 4 g par habitant. Il est dû essentiellement au métabolisme de l'individu et à l'usage de formulations détergentes. Les rejets varient d'ailleurs suivant les jours de la semaine.

- **Tensio-actifs**

La généralisation de l'emploi de détergents biodégradables a réduit les difficultés d'exploitation des stations liées aux mousses, mais leur consommation continue à croître

- **Micro-éléments**

Les éléments nocifs les plus importants sont les métaux lourds. Leur principale origine est industrielle. Le cuivre, le zinc, le cadmium, le chrome, le plomb, le mercure, le nickel sont les polluants les plus fréquemment rencontrés. Les concentrations de ces éléments sont en général inférieures au $mg.l^{-1}$ Le rejet dans le réseau, et à plus forte raison dans le milieu naturel, de produits toxiques est légalement prohibé (ex. cyanures, composés cycliques hydroxylés).

Le tableau 9 donne, pour la France, les fourchettes des caractéristiques moyennes des ERU.

Tableau 9. Caractéristiques des ERU françaises.

Paramètres	**Échelle variation**	**Fraction décantable**
pH	7,5 à 8,5	
Extrait sec $mg.l^{-1.}$	1000 à 2 000	10
MES totales $mg.l^{-1.}$	150 à 500	50 à 60
DBO_5 $mg.l^{-1.}$	100 à 400	20 à 30
DCO $mg.l^{-1.}$	300 à 1000	20 à 30
COT $mg.l^{-1.}$	100 à 300	
NTK $mg.l^{-1.}$	30 à 100	10 %
$N\text{-}NH_4^+$ $mg.l^{-1.}$	20 à 80	0%
$N\text{-}NO_2^-$ $mg.l^{-1.}$	< 1	0
$N\text{-}NO_3^-$ $mg.l^{-1.}$	< 1	0
Détergents $mg.l^{-1.}$	6 à 13	0
P $mg.l^{-1.}$	10 à 25	10%

4.3.4. Agents pathogènes

Les ERU transportent de nombreux micro-organismes dont certains sont pathogènes: bactéries, virus, protozoaires, helminthes (voir chapitre 6). Les bactéries pathogènes les plus fréquemment rencontrées sont les salmonelles dont la concentration est de l'ordre de $l0^2$ à 10^3 pour 100 ml.

Comme l'identification des organismes pathogènes dans l'eau est longue, le comptage de germes test est utilisé pour les contrôles de routine. Les germestest les plus fréquemment utilisés sont les coliformes totaux ainsi que les coliformes fécaux (formés essentiellement des Escherichia coli) et parfois aussi les streptocoques fécaux. Dans 100 ml d'ERU sont dénombrés le plus souvent de 10^7 à 10^8 coliformes totaux et 10^6 à 10^7 coliformes fécaux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La disparition de coliformes dans un effluent ne signifie pas que celui-ci ne contienne plus de germes pathogènes. En ERU, l'intérêt des germes test réside surtout dans l'estimation du niveau de décontamination (ou de désinfection partielle) réalisée: on l'exprime par le nombre d'unités logarithmiques (puissance de 10) dont un traitement a permis d'abaisser la numération initiale de l'eau brute.

4.3.5. Potentiel d'oxydoréduction Septicité

Les eaux usées domestiques suffisamment fraîches ont un potentiel d'oxydoréduction de l'ordre de 100 mV, ce qui correspond pour un pH voisin de 7, à un rH de 17 à 21 (voir page 249). Un potentiel à + 40 mV (soit rH =15 à pH = 7) ou négatif caractérise un milieu réducteur (eaux septiques, fermentations putrides, présence de réducteurs chimiques). Un potentiel supérieur à 300 mV (soit rH = 24 à pH = 7) révèle un milieu oxydant anormal.

La septicité de l'effluent conduit à la formation de sulfure (S^{2-}) et provoque le dégagement d'H_2S.

La figure 2 4 schématise l'évolution des eaux en fonction de leur pH et de leur rH.

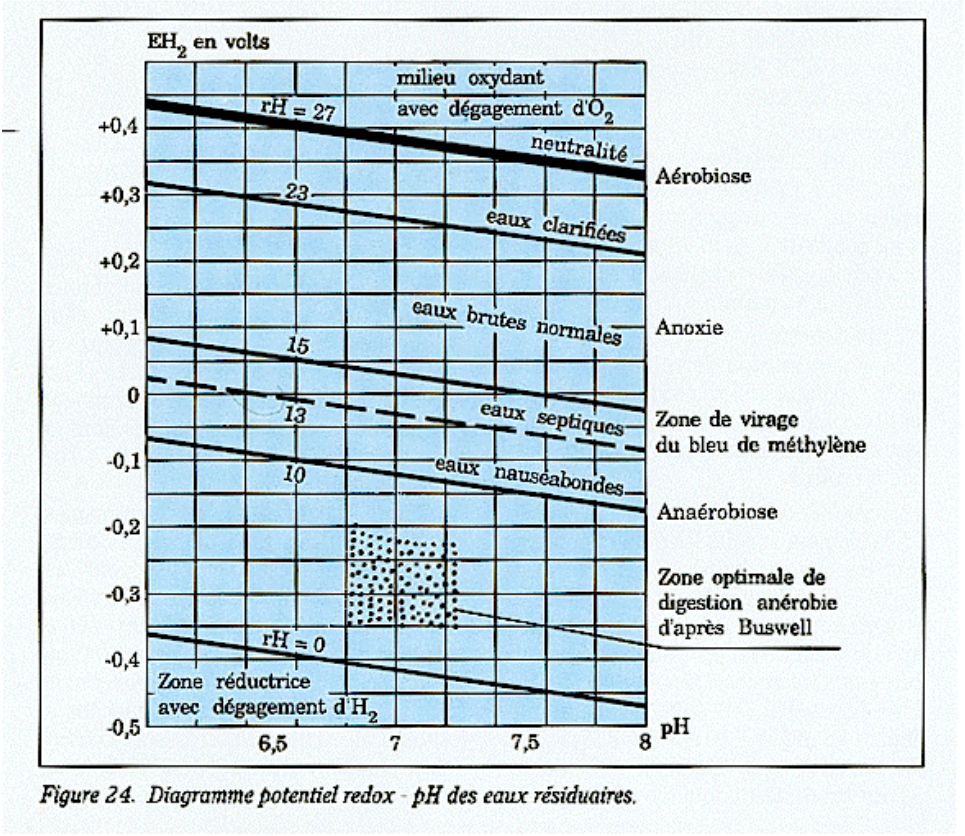


Figure 24. Diagramme potentiel redox - pH des eaux résiduaires.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.3.6. Matières de vidange

Les matières de vidange peuvent avoir des caractéristiques très variables selon leur origine; elles proviennent de fosses étanches essentiellement de deux types

- celles à "effet d'eau" (très faible volume d'eau mélangé aux matières fécales) avec fréquence de vidange généralement annuelle, qui sont très concentrées (DCO comprise entre 12 et 30 $g.l^{-1}$),

-celles équipées de chasse d'eau, à fréquence de vidange plus rapprochée et qui sont beaucoup plus diluées (DCO de l'ordre de 2 $g.l^{-1}$).

Le volume disponible de la fosse de vidange permet d'espacer plus ou moins la fréquence d'évacuation et d'assurer ou pas une digestion préliminaire de ces matières. Le tableau 10 donne les caractéristiques de ces produits dans certains pays.

4.3.7. Pointes de pollution

On constate généralement une variation de la concentration en pollution sensiblement concomitante à celle de la variation de débit. Il s'en suit des variations du flux polluant supérieures à la simple variation du débit. Ce phénomène est particulièrement sensible sur le paramètre MES dans le cas de réseaux unitaires.

Tableau 10. Composition de matières de vidange'

Paramètres (concentrations en $g.l^{-1}$)	**Variations usuelles**		**Cas particuliers**
	en France	au japon (night soifs)	Arabie Saoudite (TAIF)
pH	7,7 à 8,5	6,4 à 7,9	6,2
DCO	2 à30	8 à 15	1,75
DBO	1,5 à 10	5 à 9	0,42
MES	2 à 10	20 à 35	0,66
Azote total Kjeldhal	0,5 à 2,5	3,5 à 6	0,17
dont azote ammoniacal	0,4 à 2	3 à 4	0,12

4.4. FINALITÉ DU TRAITEMENT OBJECTIF DE QUALITÉ

La finalité du traitement des effluents avant rejet est la protection du milieu naturel. Progressivement, la réglementation a diversifié les niveaux de rejet possibles pour les adapter à des objectifs de qualité de la rivière fixés par les Autorités responsables de la gestion des ressources en eau. Les objectifs de qualité tiennent compte des usages prioritaires de l'eau de la rivière dans les biefs situés en aval (pêche, baignade, alimentation en eau potable). Ils correspondent à une classification des rivières dont on trouvera un exemple avec le tableau 11.

Pour tenir compte du caractère aléatoire des variations hydrologiques des rivières, ces objectifs de qualité doivent être respectés pour tout débit inférieur à un débit de fréquence donnée (méthode française) ou pendant un nombre de j ours minimal de l'année (approche anglaise).

Dans le cas de rejet dans les estuaires et en mer, les conditions de rejet adoptées tiennent compte des activités spécifiques à la zone côtière concernée (baignades, conchyliculture).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 11. Critères d'appréciation globale de la qualité de l'eau des rivières. (Grille utilisée par l'Agence de Bassin ADOUR-GARONNE).

		1A	1B	2	3
	Conductivité µS/cm à 20 °C	=400	400 à 750	750 à 1500	1500 à 3 000
	Température	=20	20 à 22	22 à 25	25 à 30
	pH	6,5 à 8,5	6,5 à 8,5	6 à 9	5,5 à 9,5
	MES $mg.l^{-1}$	= 30	= 30	=30	30 à 70
	O^2 dissous $mg.l^{-1}$	> 7	5 à 7	3 à 5	milieu aérobie à
	O^2 dissous en % de saturation	> 90 %	70 à 90	50 à 70	Maintenir en en permanence
	DBO_5 ($mg.l^{-1}$)	=3	3à5	5à10	10à25
	Oxydabilité $mg.l^{-1}$	=3	3 à 5	5 à 8	
	DCO $mg.l^{-1}$	=20	20 à 25	25 à 40	40 à 80
	NH_4 ($mg.l^{-1}$)	=0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8
	$M0_3$ ($mg.l^{-1}$)			< 44	44 à 100
	N total (Kjeldahl)	=1	1 à 2	2 à 3	
	Fe ($mg.l^{-1}$)	=0,5	0,5 à 1	1 à 1,5	
	Mn $mg.l^{-1}$	=0,1	0,1 à 0,25	0,25 à 0,50	
	F $mg.l^{-1}$	=0,7	0,7 à 1,7	0,7 à 1,7	> 1,7
	Cu $mg.l^{-1}$	=0,02	0,02 à 0,05	0,05 à 1	> 1
	Zn $mg.l^{-1}$	=0,5	0,5 à 1	1 à 5	> 5
	As ($mg.l^{-1}$)	=0,01	=0,01	0,01 à 0,05	> 0,05
	Cd $mg.l^{-1}$	=0,001	=0,001	=0,001	> 0,001
	Cr $mg.l^{-1}$	=0,05	=0,05	=0,05	> 0,05
	CN ($mg.l^{-1}$)	= 0,05	=0,05	=0,05	> 0,05
	Pb $mg.l^{-1}$	=0,05	=0,05	=0,05	> 0,05
	Se ($mg.l^{-1}$)	=0,01	=0,01	=0,01	> 0,01
	Hg ($mg.l^{-1}$)	=0,0005	=0,0005	=0,0005	> 0,0005
	Phénols $mg.l^{-1}$		=0,001	0,001 à 0,05	0,05 à 0,5
	Détergents $mg.l^{-1}$	=0,2	=0,2	0,2 à 0,5	> 0,5
	S.E.C.* $mg.l^{-1}$	< 0,2	0,2 à 0,5	0,5 à 1	> 1
	Coliformes (Num. 100 ml)	=50	50 à 5 000	5 000 à 50 000	
	Esch. Coli (Num. 100 ml)	= 20	20 à 2 000	2 000 à 20 000	
	Strep. féc. (Num. 100 ml)	< 20	20 à 1000	1000 à 10000	
	Ecart de l'indice biotique** par rapport à l'indice normal	1	2 ou 3	4 ou 5	6 ou 7

Nota: (*) Substances extractibles au chloroforme; (**) cf. page 31.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Nota sur l'utilisation du tableau 11.

- La qualité d'une eau dépend de nombreux paramètres (température, ammonium (NH J' mercure (Hg)...).
- On a coutume d'attribuer à une eau la qualité qui est donnée par le paramètre mesuré le plus défavorable.
- Cette qualité est celle qui, d'après les seuils figurant dans la grille, est atteinte par au moins 10% dés plus mauvaises mesures de ce paramètre.

Classe 1A : Elle caractérise les eaux considérées comme exemptes de pollution, aptes à satisfaire les usages les plus exigeants en qualité.

Classe 1B : D'une qualité légèrement moindre, ces eaux peuvent néanmoins satisfaire tous les usages.

Classe 2 : Qualité "passable": suffisante pour l'irrigation, les usages industriels, la production d'eau potable après un traitement poussé. L'abreuvage des animaux est généralement toléré. Le poisson y vit normalement mais sa reproduction peut y être aléatoire. Les loisirs liés à l'eau y sont possibles lorsqu'ils ne nécessitent que des contacts exceptionnels avec elle.

Classe 3 : Qualité "médiocre": juste apte à l'irrigation, au refroidissement et à la navigation. La vie piscicole peut subsister dans ces eaux, mais cela est aléatoire en période de faibles débits ou de fortes températures, par exemple.

Hors Classe: Eaux dépassant la valeur maximale tolérée en classe 3 pour un ou plusieurs paramètres. Elles sont considérées comme inaptes à la plupart des usages et peuvent constituer une menace pour la santé publique et l'environnement

4.5. RÉUTILISATION DES EAUX USÉES

4.5.1. Usage agricole

L'emploi des eaux usées en agriculture est très ancien et les champs d'épandage ont constitué les premiers systèmes d'épuration. Le sol est un filtre efficace et un hectare contient jusqu'à une ou deux tonnes de micro-organismes. Aujourd'hui l'intérêt principal de la réutilisation des eaux usées en culture est plus souvent l'apport d'eau indispensable aux plantations (zones arides) que l'épuration par le sol ou l'apport d'éléments nutritifs.

Des dispositions doivent être pris es pour éviter les dépôts et la corrosion dans le système de distribution et un traitement préliminaire de décantation des effluents bruts est dans tous les cas à conseiller. Un prétraitement biologique est aussi souvent recommandé. Il permet, en particulier, de réduire sensiblement les risques d'odeurs.

Deux catégories de risques sont liées à cet usage des eaux usées

. Les risques sanitaires pour les populations avoisinantes et les consommateurs de produits agricoles.

Suivant l'état sanitaire endémique local, les méthodes culturales, les habitudes de vie et les conditions climatiques, les risques sont très différents. Cependant, on peut considérer que de façon générale l'utilisation d'eaux résiduaires sur ou à proximité de végétaux à consommer crus est à écarter. La gestion correcte de périodes d'arrêt de l'épandage ainsi que de séchage de la récolte réduit ces risques. L'utilisation d'eaux résiduaires sur les prairies de fauche ne semble pas poser de grands problèmes; il n'en est pas de même sur les prairies paturées.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les cultures les plus adaptées sont l'arboriculture, les céréales, les betteraves et les oléagineux. L'épandage par irrigation est préférable à celui par aspersion.

. **Les risques pour les sols et les cultu**res: colmatage du sol, accroissement de salinité, apport de toxiques.

Les propriétés physiques du sol peuvent être modifiées par les pratiques d'épandage. La structure peut, en particulier, être détruite par un apport excessif de sodium et une absence de lessivage (en particulier dans les zones à trop faible pluviométrie). La connaissance du RAS de l'effluent (rapport d'absorption de sodium) est alors importante

$$RAS = \frac{(Na^+)}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+}) + (Mg^{2+})}{2}}}$$

Il y a danger si le RAS approche 10 ; cela n'arrive en général que sur certains effluents concentrés (distilleries, sucreries, fromageries).

Une trop forte salinité de l'effluent (> 2 $mg.l^{-1}$) entraîne aussi des difficultés et conduit à un contrôle plus attentif des quantités d'eaux épandues et de l'évolution de la salinité du terrain de culture. Le rapport C/N reste essentiel pour les besoins culturaux. La relation N/P/K présente généralement un fort excès d'azote dans les effluents domestiques. Un des inconvénients de la réutilisation agricole peut être l'enrichissement de la nappe en nitrates.

Les tableaux 12 et 13 donnent un exemple des valeurs-guides pour l'eau d'irrigation adoptées en Californie.

Tableau 12. Tableau des valeurs-guides des caractéristiques principales de l'eau d'irrigation.

	Limitation d'usage		
Caractéristique	Pas	Modérée	Forte
Salinité en $mg.l^{-1}$	< 450	450 - 2000	> 2000
Conductivité spécifique en NS.cml (CE)	< 700	700 - 3000	> 3000
RAS = 0-3	> 700	700-200	< 300
= 3-6	> 1200	1200-300	< 300
= 6 –12 CE	> 1900	1900 - 500	< 500
=12 - 20	> 2 900	2 900 -1300	< 1300
=20 - 40	> 5 000	5 000 - 2 900	< 2 900
Na			
Irrigation en surface - RAS	< 3	3 - 9	> 9
Irrigation par aspersion $mg.l^{-1}$	< 70	> 70	
Cl			
Irrigation en surface $mg.l^{-1}$	< 140	140 - 350	> 350
Irrigation par aspersion $mg.l^{-1}$	< 100	> 100	-
pH	de 6,5 à 8,4		

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 13. Tableau des valeursguides d'éléments traces dans l'eau d'irrigation (1).

Caractéristique	Valeur limite $mg.l^{-1}$
Al	5
As	0,10
B	0,75
Bc	0,10
Cd	0,010
Cz	0,10
Co	0,05
Cu	0,2
F	1
Fe	5
Li	2,5
Mn	0, 2
Mo	0,01
Ni	0,2
Pb	5
Se	0,02
Va	0,10
Zn	2,0

(1) Les valeurs sont données pour une exploitation agricole continue et une quantité d'eau annuelle d'environ 1,20 m. Pour les exploitations de plus courte durée, ces valeurs peuvent être augmentées.

Les eaux usées sont aussi utilisées pour l'arrosage de terrains de loisirs golfs, parcs, etc. Cet arrosage est fréquemment réalisé par aspersion. Le traitement nécessaire est alors poussé et doit se terminer par une désinfection après élimination des matières en suspension et de la pollution organique.

4.5.2. Usage industriel

L'eau résiduaire après traitement peut être une source d'eau tout à fait adaptée aux besoins industriels en particulier pour le refroidissement et les lavages. Les réalisations sont maintenant assez nombreuses.

Très souvent une élimination poussée de la pollution organique est nécessaire et le traitement biologique est alors suivi d'un traitement de finition.

L'eau, après un traitement tertiaire très complet, comprenant entre autres une étape de déminéralisation, peut être utilisée pour l'alimentation de chaudières basse pression. Des essais de longue durée ont démontré la faisabilité de cette solution pour des chaudières moyenne pression.

4.5.3. Usage domestique et municipal

La réutilisation des eaux usées traitées au domicile de l'habitant ou à l'échelle de la ville est possible à différents niveaux de qualité et suivant plusieurs schémas

- recyclage partiel à l'intérieur d'immeubles. Cette solution qui a fait l'objet d'applications en Extrême-Orient consiste le plus souvent à alimenter les chasses de toilette au moyen des autres eaux usées qui sont réutilisées après traitement,
- alimentation de réseaux municipaux de lavage (rues, camions, etc.) et de réseaux d'incendie. Cette utilisation ne doit pas apporter de gène d'exploitation dans le réseau (dépôts, développements bactériens, corrosion, etc.) ni entraîner de risques sanitaires inacceptables,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- réalimentation partielle de nappes d'eaux souterraines, (lits filtrants...),
- constitution de barrières hydrauliques souterraines empêchant l'introduction d'eau de mer dans les aquifères côtiers, - réinjection dans le circuit d'eau potable. Cette utilisation exige des chaînes de traitement très complètes mais ne se heurte pas à une impossibilité technique. Elle a été mise en couvre dans des contrées désertiques et elle a été aussi étudiée pour des navires spatiaux. La salinité de l'effluent réutilisé conduit souvent à le mélanger à de l'eau douce pour respecter les normes de potabilité. Sinon un dessalement est nécessaire. L'élimination de la pollution organique, de l'ammonium, de la pollution bactériologique doit être très soignée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. LES EFFLUENTS INDUSTRIELS

Figure 25. Effluents d'eaux résiduaires industrielles.

5.1.
NATURE DES EFFLUENTS

Alors que les rejets domestiques présentent des caractéristiques relativement peu variables, l'extrême diversité des rejets industriels nécessite une investigation propres à chaque type d'industrie et souvent le recours à des procédés spécifiques

Il est donc fondamental d'être parfaitement informé sur les procédés de fabrication et l'organisation des circuits

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.1.1. Origine des *effluents*

Quatre catégories de rejet doivent être distinguées dans l'industrie

5.1.1.1. Effluents généraux de fabrication

La plupart des procédés conduisent à des rejets polluants qui proviennent du contact de l'eau avec des gaz, liquides ou solides.

Les rejets sont soit continus, soit discontinus. Ils peuvent même n'être produits que durant quelques mois par an (campagne dans l'industrie agro-alimentaire, deux mois en sucrerie de betteraves par exemple).

Généralement les flux de pollution sont connus si les fabrications sont régulières, mais si les industries travaillent par campagnes spécifiques (chimie de synthèse, pharmacie, parachimie) l'analyse des rejets est plus difficile, ceux-ci évoluant constamment

5.1.1.2. Effluents particuliers

Certains effluents sont susceptibles d'être séparés soit pour un traitement spécifique avec éventuellement récupération, soit dans un bassin de stockage pour être réinjectés à débit pondéré dans le circuit de traitement

Tel est le cas des

- bains de décapage et galvanoplastie; soudes usées; eaux ammoniacales de cokerie,
- condensats de papeterie, eaux mères de l'industrie agro-alimentaire,
- rejets toxiques et rejets concentrés.

5.1.1.3. Effluents de service généraux

- Eaux vannes (cantines, etc.).
- Eaux de chaufferie (purges chaudière, éluats de régénération).
- Boues du traitement des eaux d'appoint
- Purges d'eaux de réfrigération.

5.1.1.4. Rejets occasionnels

Ceux-ci ne doivent pas être oubliés, ils peuvent correspondre :

- à des fuites accidentelles de produits lors de leur manutention ou de leur stockage,
- à des eaux de lavage de sols,
- à des eaux polluées, dont celles d'orage qui peuvent causer aussi une surcharge hydraulique.

5.1.2. Caractérisation générale des *effluents*

Pour la bonne définition d'une station de traitement d'eaux résiduaires, il est nécessaire de pouvoir disposer des éléments suivants

- fabrications types, capacités et cycles, matières premières consommées,
- composition de l'eau d'appoint à l'usine,
- possibilité de séparation des rejets, et/ou de recyclages,
- volumes journaliers d'effluents par catégories,
- débits horaires moyens et maximaux (durée et fréquence par catégorie),
- flux de pollution moyen, maximal (fréquence et durée) par catégorie de rejet et pour une pollution spécifique de l'industrie considérée.

Il est souvent utile d'être informé d'une pollution secondaire, même occasionnelle, pouvant perturber gravement le fonctionnement de certains organes des équipements de traitement (colles, goudrons, fibres, huiles, sables...).

Dans le cadre de l'étude d'une usine nouvelle, ces données, recueillies après l'analyse des fabrications, sont à comparer aux données provenant d'usines existantes similaires.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La connaissance de la composition d'appoint est souvent nécessaire.

5.1.3. Paramètres spécifiques de pollution

Les apports significatifs de pollution énumérés ci-après sont classés en fonction des modes de traitement dont ils sont justiciables :

Éléments insolubles séparables physiquement avec ou sans floculation

- Matières flottantes (graisses, hydrocarbures aliphatiques, goudrons, huiles organiques, résines...).
- Matières en suspension (sables, oxydes, hydroxydes, pigments, soufre colloïdal, latex, fibres, adjuvants de filtration,...).

Éléments organiques séparables par adsorption

- Colorants, détergents, composés macromoléculaires divers, composés phénolés, dérivés nitrés, dérivés chlorés.

Éléments séparables par précipitation - Métaux toxiques ou non, Fe, Cu, Zn, Ni, Al, Hg, Pb, Cr, Cd, Ti, Be précipitables dans une certaine zone de pH, sulfures.
- Po_4^{2-} SO_4^{2-} , SO_3^{2-} F^-

Éléments séparables par dégazage ou strippage

- H_2S. NH_3, SO_2, phénols, hydrocarbures légers ou aromatiques, dérivés chlorés.

Éléments pouvant nécessiter une réaction d'oxydoréduction

- CN , Cr_{VI} S^{2-}, Cl_2, NO_2^-

Acides minéraux et bases

- Acides chlorhydrique, nitrique, sulfurique et fluorhydrique.
- Bases diverses.

Eléments concentrables par échange d'ions ou par osmose inverse

- Radionucléides tels que I*, Mo*, Cs*.
- Sels d'acides et de bases forts, composés organiques ionisés (échange d'ions) ou non (osmose inverse).

Éléments biodégradables

- Par exemple sucres, protéines, phénols. Après acclimatation, certains composés organiques tels que formol, aniline, détergents et même hydrocarbures aromatiques peuvent être oxydés ainsi que certains composés minéraux ($S_20_3^{2-}$, $S0_3^{2-}$).

Coloration

Les effluents industriels peuvent être fortement colorés. Cette coloration est due à des colloïdes (pigments, sulfures) ou à des substances dissoutes (matières organiques, dérivés nitrés).

Sur le **plan analytique** il faut noter

1) Le rapport entre DCO et $DB0_5$ des ERI est souvent très différent de celui des ERU. Il évolue aux divers stades du traitement, la DCO finale pouvant quelquefois dépasser dix fois la valeur de la $DB0_5$ correspondante.

2) La présence de toxiques très actifs peut masquer la présence de matières biodégradables et fausser gravement la mesure de la DBO_5.

Les notions de traitabilité biologique des eaux résiduaires sont exposées au chapitre 4, page 287.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.2
CONDITIONS DE REJET

Les normes de rejet adoptées sont très variables

-.les paramètres de pollution sont plus nombreux que pour les ERU et sont spécifiques des industries

- les exigences des législations concernant des paramètres spécifiques (hydrocarbures, métaux lourds, F^-, CN^-, phénols en particulier) dépendent de méthodes de mesure différentes et sont de sévérité inégale suivant les pays.

Les effluents peuvent être rejetés directement dans le milieu naturel ou dans des égouts urbains aboutissant à des stations biologiques dont ils ne doivent pas perturber le fonctionnement

Si l'usage courant implique des limitations de concentrations dans l'effluent, l'imposition de quantités rejetées maximales par jour ou par unité de produit élaboré devient plus fréquente. On considère aussi des moyennes mensuelles et des maximums journaliers.

Parfois certaines tolérances sont prévues dans l'application des normes si leur application stricte conduit à une "impossibilité" économique. De toute façon, les normes doivent tenir compte des sensibilités des méthodes de dosage et des possibilités techniques de traitement

Les tableaux 14 et 15 montrent la complexité de ce problème.

Tableau 14. Méthodes de dosage et échelle possible des normes pour certains composés organiques.

Composés	**Méthodes**	**Échelle de normes rencontrées (**$mg.l^{-1}$ **)**
Cyanures libres (Epstein)	- T 90.108 (F)	0,2 - 1
	ASTM D 203682 C	
Cyanures totaux (sauf SCN)	- T 90.107 (F)	2 - 6
	ASTM D 203682 A	
Phénols entraînables à	- T 90.204	0,5 - 5
la vapeur d'eau (DAAP)	- API 71657	
Phénols totaux		5 - 10
Hydrocarbures insolubles	- T 90.202 (F)	
(précipitation sur floc,	- HMSO 1972 (UK)	2 - 10
extraction, gravimétrie)	- API 73253	
Hydrocarbures totaux	- T 90.203 (F)	
en raffinerie (spectro-	- CONCAWE 1/72	15 - 30
photométrie, IR, 2 pics)	- S.M AWWA 502 B	
Tensio-actifs anioniques	- ASTM D 2330	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 15. Exemples de normes relatives aux métaux (mg.l^{-1}). Ces normes concernent souvent le métal total, quelquefois le métal ionisé.

Métaux totaux	FRANCE Galvanoplastie traitement surface	PAYS-BAS Incinération ordures (ELG)	R.F.A. Désulfuration de fumées (ELG)	SUISSE Rejets en lac
Ag	-	0,1	-	0,1
Al	5	-	-	10
Cd	0,2	0,05	0,05	0,1
CrIII	3	0,2	0,5	2
CrVI	0,1			0,1
Cu	2	-	0,5	0,5
Fe	5	-	-	2
Hg	-	0,01	0,05	0,01
Ni	5	0,5	0,5	-
Pb	1	1	0,1	0,5
Se	-	-	-	2
Zn	5	0,5	1	2
Vd	-	-	-	-

5.3. INCIDENCES DU RECYCLAGE DES EAUX ET DES TECHNIQUES PROPRES

Le développement des industries en deux étapes successives a, dans beaucoup de cas, conduit à une réduction des volumes de rejets et des flux polluants.

5.3.1. Recyclage

Le recyclage, d'abord imposé en réfrigération pour diminuer les consommations d'eau, a eu ensuite pour but la maîtrise des rejets. Il a été très poussé en sidérurgie (consommation instantanée de 200 m^3 par tonne acier ramenée à des appoints de 5 m^3 par tonne sinon 3) en fabrication de papier (réduction de plus de 50-100 m^3 par tonne à moins de 5) et en fabrication d'agglomérés. Cela est envisageable quand la pollution principale est insoluble et éliminable par un procédé physico-chimique simple situé sur le circuit ou en dérivation.

5.3.2. Techniques propres

Moins polluer en produisant mieux est un défi auquel se trouve conviée l'industrie par les responsables de l'environnement et qui doit s'intégrer dans l'optimisation des procédés de fabrication.

De nombreuses actions entreprises et réussies sont connues dont on ne citera que les exemples les plus significatifs relatifs évidemment aux seuls effluents liquides.

Le remplacement d'une émission gazeuse par un rejet liquide grâce à un lavage ne doit pas être un transfert de pollution et doit se justifier par une épu

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ration plus aisée de ce rejet ou par un recyclage direct des eaux de lavage en procédé (cas des usines d'ammonitrates).

Plusieurs voies peuvent caractériser ces actions

- **Suppression des effluents** par la. création de procédés nouveaux "à sec" comme cela peut être le cas en traitement de surface

- remplacement du chromage par une nitruration ionique à chaud,

- remplacement du cadmiage par une application d'aluminium en vapeur ionisée,

- remplacement de la galvanisation par la rilsanisation (plastique).

- **Séparation et éventuellement récupération** de matières premières dissoutes, toxiques ou coûteuses, par exemple

- solvants séparés par distillation

fabrication de peinture (HC), de résines sulfonées (dichloroéthane), pharmacie (éthanol), mégisserie (pétrole),

- chrome fixé sur résines chrome trivalent de bains de chromage, récupéré sous forme de chromate, acide chromique de bains de passivation chromique avec recyclage des éluats dans les bains,

- **Séparation de composés en suspension** provenant de la fabrication et réintégration possible dans le procédé

- boues de décantation en cartonnerie,

- huiles des raffineries alimentaires et des margarineries,

- graisses et protéines d'abattoirs.

- **Séparation de composés dissous synthétisés dans les procédés**

- phénol des soudes usées avec extraction liquide-liquide par une coupe pétrolière recyclée,

- ammonium des eaux de formation en cokerie ou en production d'acides aminés, séparé par entraînement à la vapeur puis récupérable par condensation ou sulfatation

.

5.4. INDUSTRIES AGRO-ALIMENTAIRES (I.A.A..)

Les caractéristiques communes à toutes les eaux résiduaires de l'industrie alimentaire sont: une pollution essentiellement organique et biodégradable, une tendance générale à l'acidification et à la fermentation rapides. Toutes ces eaux se traitent essentiellement par voie biologique, mais le milieu est souvent carencé en azote et en phosphore.

5.4.1. Porcheries

Les pollutions dépendent du type d'élevage, du mode de nettoyage des cases, de la durée du stockage sous les cases et du type d'alimentation.

Rejet par porc	Nettoyage	Nettoyage
par jour	hydraulique	à sec
Eau	17-251	11-131
DBO_5	100 - 200 g	80 - 120 g
NTK	18-35 g	
DCO	300 à 500 g	

Dans les pays chauds, l'arrosage des porcs conduit à une majoration des volumes d'eau précédents.

Analyse de lisier en $g.l^{-1}$	
MES	30 à 80
DCO	25 à 60
DBO_5	10à30
NTK	2à5
NH_4 total	3à4
Cl	0,8
SO_4	1,5 à 2
TAC	400°F - 1500° F
pH	7à8

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.4.2. Abattoirs et industries annexes

5.4.2.1. Abattoirs industriels de bétail

Ils comprennent, en plus de l'abattage, les ateliers de triperie boyauderie et le vidage des matières stercoraires, qui rejettent plus de 50 % de la pollution.

Celle-ci dépend

- du taux de récupération du sang (DBO_5: 150 à 200 $g.l^{-1}$, DCO : 300 à 400 $g.l^{-1}$, NTK: 25 $g.l^{-1}$) qui peut atteindre 90% dans les gros abattoirs,
- du mode d'évacuation des matières stercoraires, la voie hydraulique étant en abandon,
- de l'importance de la triperie-boyauderie,
- des ateliers annexes (salaison-conserveries).

Il en résulte des volumes d'eau rejetés plus faibles dans les abattoirs modernes. En Europe, ces volumes peuvent être estimés à :

- 6 à 9 l par kg de carcasse de bovins (320 à 350 kg),
- 5 à 11 l par kg de carcasse de porcins (80 à 90 kg).

D'après une enquête du CEMAGREF, les volumes d'eau consommés peuvent se répartir ainsi

Atelier ou poste	**Volume en litres par kg de carcasse**
Chaîne abattage	
- bovins	4,8 dont lav. panses
- porcins abattage	4,1
- lavage panses	2,0
Triperie gros bovins	2,4
Boyauderie	
Gros bovins	0,4 à 0,7
Lavage camions	0,20 à 0,6

Selon la même enquête, la représentation des charges polluantes était la suivante:

g par kg de carcasse	**Abattoirs gros bovins et polyvalents**	**Abattoirs porcins**
DCO	32,3 ± 5,2	27,3 ± 9
DBO_5	13,2 ± 2,2	13,2 ± 4,3
Graisses (SEC)	5,2 ± 1,5	
N total	1,6 ± 0,3	1,6 ± 0,5
MES	11,8 ± 2,5	9,3 ± 3,4

On note que

- l'incidence de l'atelier triperie-boyauderie représente plus de 50 % de la pollution en DCO d'un abattoir complet,
- les fortes teneurs en MES quelquefois rencontrées correspondent à des matières cellulosiques fibreuses non biodégradables,
- les charges des industries annexes (salaisons et conserveries) en $DB0_5$ sont de l'ordre de 10 à 2 0 g par kg de produit fini.

5.4.2.2. Abattoirs de volailles

Les opérations polluantes sont principalement

- saignée,
- échaudage et plumaison avec transport humide ou à sec (pneumatique),
- éviscération avec transport, hydraulique ou à sec, et lavage.

Le recyclage ou non des eaux de transport peut influer sur la concentration des eaux. L'atelier de cuisson-déshydratation

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

des sous produits (alimentation animale) apporte une charge polluante environ dix fois plus faible que l'abattoir lui-même.

Même avec un réseau séparé de collecte des eaux de procédé pour récupération de protéines, il y a souvent une dispersion des mesures en raison de la complexité des ateliers et de l'inertie des égouts. La séparation des effluents chauds peut en permettre le refroidissement plus économique et la ségrégation plus facile d'une pollution élevée en graisses avec un prétraitement particulier.

Les enquêtes CEMAGREF effectuées sur cinq usines donnent les valeurs moyennes suivantes par kg de carcasse (poids moyen 1,4 à 1,5 kg)

Volailles	Mesures
Volume eaux usées en l	8,1 ± 0,9
DCO en g	21±6
DBO_5 en g	9,3 ± 2,5
MES en g	4,5 ± 1

5.4.2.3. Industrie des peaux, colles et gélatines

- **Tanneries et mégisseries**

Ces ateliers comportent un prétraitement commun des peaux par trempage, pelanage dans un bain de chaux additionné de sulfures et rinçage; l'effluent peut contenir jusqu'aux 3/4 de la charge de pollution (atelier de travail en rivière).

La phase ultérieure du traitement est le tannage qui peut être réalisé

- dans les tanneries à partir de tannins végétaux ou surtout de sels de chrome que l'on trouve dans les rejets correspondants, -dans les mégisseries à partir de saumure de NaCL et d'aluns (pollution principalement minérale).

Évaluation des rejets. Les volumes en sont très variables

- 20 à 120 m^3 par tonne si tannage au chrome (2 à 3 kg Cr^{3+} par tonne de peaux),
- 2 0 à 90 m^3 par tonne si tannage végétal,
- 200à250kgDC0 et 75 à 150kg MES par tonne de peaux (30 kg environ pour un bovin).

Dans les grandes usines, on cherche à collecter séparément

- les effluents de traitement préliminaire,
- les bains de tannage (3 à 6 $g.l^{-1}$ 1 Cr^{3+} pH 3,5),
- les eaux alcalines sulfurées.

Les rejets contiennent des colloïdes protéiniques, des graisses, des poils, des colorants, des chlorures et des sulfures provenant de pelanage.

. **Colles et gélatines**

Dans cette industrie, les matières premières sont les peaux fournies par les tanneries et les os fournis par les abattoirs qui subissent une solubilisation acide puis une hydrolyse alcaline dans un lait de chaux, alors que les peaux de porcins (pig skin) subissent un seul lavage acide des couennes avant flottation des graisses.

Les volumes d'eaux résiduaires peuvent être de 60 à 70 m^3 par tonne d'os et correspondre à 50 kg $DB0_5$ par tonne de colles produites.

5.4.2.4. Valorisation des protéines des effluents d'abattoirs

Pour 1000 tonnes de bétail, on peut estimer la perte possible de protéines dans les effluents à 2 tonnes qui sont récupérables sous forme de boues protéiniques en épuration primaire après déglillage et dessablage.

Le traitement physico-chimique réalisable avec des floculants minéraux ou organiques permet de réduire la $DB0_5$ et les MES des effluents de respectivement 80 à 85% et 85 à 90%.

Les eaux vannes et les eaux de nettoyage des locaux et des camions doivent bien entendu avoir été préalablement écartées des eaux d'abattage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.4.3. Industries laitières

. Origine des rejets

- Pasteurisation et ensachage: pertes de lait, eaux de lavage diluées à pH très variable. - Fromageries et caséineries : rejet de sérum déprotéiné mais riche en lactose

- Beurreries: rejet de babeurre, pauvre en matières grasses mais riche en lactose et protéines.

Pollution globale très dépendante de la récupération de lactosérum (pertes minimales de 7 %).

- **Évaluation des rejets**

Leur volume dépend des recyclages (refroidissement et récupération de condensats).

Leur concentration dépend aussi de la nature des produits laitiers rejetés.

Tableau 16. Rejets des industries laitières

Atelier ou poste	**Volume d'eau** 1 par 1 lait	**DBO** $mg.l^{-1}$	**MES** $mg.l^{-1}$
Laits de consommation et yoghourts	1 - 25	120 à 300	50
Poudres lait et beurrerie	1 - 3	80 à 300	30
Caséineries	2 - 4	400 à 500	100
Fromageries	2 - 3	400 à 900	100
Usines polyvalentes	3 - 6	300 à 750	120

Tableau 17. Analyses types de produits laitiers (en $g.l^{-1}$).

Titre	**Lait entier**		**Lait écrémé**	**Lactosérum**	**Babeurre**
	Vache	**Chèvre**			
DBO_5	90-120		50 - 73	34 à 55	60 à70
Ca	1,25	1,3	1,2		1,2
K	1,5	2,0			
P	0,95	0,9	0,9	0,8	0,95
C1	1,1	1,3	1		1,
M.S	130	114		60 - 45	
Mat. gras.	39	33	0,8	0,5 - 2	3
MAT*	33	29	35	7,9	30
Lactose	47	43	50	47 - 50	44
Acide					
lactique				2 - 6	1
Cendres					
$(g.kg^{-1})$	8-9	8		5-7	

* MAT = Matières Azotées Solubles + Protéines.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Remarques sur les caractéristiques des effluents :

- Les rapports DCO/DBO_5 sont de l'ordre de 1,4 dans les laits et 1,9 dans le sérum. -Les rejets de NTK varient de 1 à 20 g pour 1001 de lait.
- Les $DB0_5$ des effluents généraux peuvent varier de 700 à 1600 $mg.l^{-1}$.
- Le pH, après homogénéisation est le plus souvent entre 7,5 et 8,8.

5.4.4. Brasseries

- **Origines des rejets**

- Remplissage des bouteilles.
- Nettoyage (bouteilles de retour, cuves de fermentation et de garde, sols).
- Filtration du moût et séparation des troubles ou des levures.

- **Pollution**: causée par la bière, les levures et des particules diverses (drèches, kieselguhr, diatomées).

- **Évaluation des rejets**

- 200 à 7001 par hl de bière, moyenne 500, provenant principalement de l'embouteillage et de la mise en fûts,
- 400 à 800 g $DB0_5$ par hl de bière suivant les récupérations internes de levures et drèches,
- pH généralement alcalin.

Atelier ou poste	DBO_5 $mg.l^{-1}$	MES $mg.l^{-1}$
Lavage de bouteilles	200 à 400	100
Lavage de cuves de fermentation et filtres	1000 à 3000	500
Lavage tanks de garde	5000 à 15000	< 50

Nota: Rapport DCO/DBO_5 après décantation de 1,8 environ. Carence en nutriments car DBO/N/P de l'ordre de 1000/10/1.

5.4.5. Industries de la pomme de terre - Féculeries

La pomme de terre contient 12 à 20 de fécule, 70 à 80 % d'eau et beaucoup de protéines. Les rejets de $DB0_5$ sont donc élevés en féculerie, alors que les prétraitements communs induisent une pollution plus minérale due au lavage.

- **Origines de la pollution**

Elles peuvent correspondre aux ateliers suivants

- communs: lavage et transport des tubercules (terres et débris végétaux, pelage à la soude ou à la vapeur (fortes concentrations en pulpe récupérable et en amidons et protéines),
- spécifiques: fabrication de pommes frites et chips (quantités importantes de matières grasses), blanchiment (forte DBO).

- **Évaluation des rejets**

Le tableau 18 précise les caractéristiques des rejets.

5.4.6. Industries de l'amidon

Les féculeries extraient l'amidon des tubercules de manioc et pommes de terre, les amidonneries par voie humide l'extraient surtout des céréales plus riches (blé, riz, maïs).

La nature des effluents dépend des traitements spécifiques des matières premières après le lavage commun.

Matière première	Volume d'eau m^3 par t	DBO_5 kg par t
Amidon de maïs	2 - 4	5 - 12
Amidon de blé (séparation Gravitaire)	10 - 12	40 - 60
Amidon de riz	8 - 12	5 - 10

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les effluents sont plutôt acides en raison, soit de fermentations lactiques, soit d'une sulfitation (pH 4 à 5).En amidonnerie par voie humide, la pollution provient de l'évaporation des eaux et est constituée d'acides organiques volatils. Une pollution notable en protéines solubles peut, par contre, provenir de l'atelier de glucoserie.

Tableau 18. Rejets des industries de la pomme de terre.

Atelier ou poste	**Volume d'eau** m^3 par t	**MES** kg par t	**DBO_5** kg par t
Préparation			
- Transport et lavage	2,5 - 6 recyclables	20 - 200	-
- Pelage et coupe	2 - 3		5 - 10
Flocons			
- Cuisson	2 - 4		10 - 15
Pommes chips			
- Cuisson	2,2-5	5-10	5-15
Féculerie			
- Lavage, râpage, dilacération	2 - 6 (eau rouge)	Pulpe à	20 - 60*
- Pressage - raffinage	1	recycler	

* Dont les eaux de préparation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.4.7. Effluents d'autres I.A.A.

Fabrication	**Origine**	**Rejets et pollutions**	
		M^3 par t	kg DCO par t
Huileries	Extraction d'huile d'olive	0,8 - 7	50 - 80
	Pressage de palme	5	80
Raffinage d'huiles	Condenseurs et désodorisation	0,2 ***	0,5 - 1
	Lavage huile par centrifugation	0,15 (pH 10, 50 - 80 °C)	3 - 5
	Lavage pâtes	0,6 (pH 1 à 2)	2 - 6 ($2\text{-}5\ g.l^{-1}\ PO_4$)
	Margarinerie	0,1 (30 °C)	0,2 - 0,5
Conserveries fruits, légumes et surgelés	Lavage, Pelage	15 - 30	8 - 38
	Blancheur	5 - 10	-
jus de fruit *	Pressage	0,15 - 0,25	0,3 - 1 pH 3 - 4
Sucreries de betteraves	Lavage et transport:	0,4 - 1,2 ***	2 - 3 (200 - 600 kgMES)
	Eaux de presses	0,2	
	Condensats excès	0,1	(NH_4)
	Eluats régénération,	-	(sels)
Sucreries de canne	Lavage canne	5 - 10	14 - 25
	Colonne barométrique - excès	0,5 - 1,5	
	Condensats - excès	0,1	
Distilleries **	Marcs de raisin - Flegmes	3 - 6	6 - 12
	Lies de vins	2 - 3	60 - 200
	Vins	0,6 - 1,2	25 – 35
	Mélasse de canne ou betterave	1,2 - 1,8	80 - 100
	Jus de betterave/canne	0,8 - 1,6	25 - 40
	Grains	0,1 - 0,2	2 - 8
Poissons Farines et conserveries	Lavage cuisson	15 - 30	40 - 60
	Préparation	1 - 5	15 - 25
Choucrouterie	Lavage		20 - 40
Plats cuisinés	Préparation cuisson		15 - 45

*Valeurs exprimées par hl jus.

**Valeurs exprimées par hl alcool pur.

*** si circuit fermé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.5. INDUSTRIES TEXTILES

Ces industries sont très diversifiées; il est plus facile de caractériser les principales activités polluantes que les effluents eux-mêmes.

5.5.1. Lavage et peignage des laines

La laine brute est un produit très chargé d'impuretés (250 à 600 kg par tonne) qui se répartissent en:

- 25 à 30 % de graisse (suintine et acides gras),
- 10 à 15 % de terre et sables,
- 40 à 60 % de sels organiques et suint.

Une pollution considérable qui dépend du procédé de lavage (détergent non-ionique) est donc rejetée dans les effluents. La DCO peut atteindre 60 $g.l^{-1}$

Paramètres	**Pollution apportée** kg par t laine brute
- DCO après	100 - 200
- DBO5 dégraissage	24 - 40
-Graisses	100 - 150
- MES	20-30

Les eaux sont chaudes (40 à 50 °C) et à un pH de 8,2 à 8,4. On cherche à en réduire le volume spécifique de 7 à 3 m^3 par tonne de laine brute.

5.5.2. Les prétraitements avant ennoblissement textile

Ils concernent surtout les fibres naturelles.

Prétraitement textile	**Volume** m par t	**$DB0_5$** kg par t	**Remarques**
Mercerisage du coton	60	20 - 60	pH 12 à 14
Lessives de cuisson et rinçage Debouillisage du coton et lin,	5 - 6	60 - 150	pH 11 à 13 (mat. grasses)
Désencollage des tissus (élimination amidons et fécules)	10 - 20	20 - 50	$\frac{DCO}{DBO} = 1,5$

5.5.3. Ennoblissement textile

Cette activité, très polluante en général, regroupe les opérations suivantes: blanchiment, teinture, impression, apprêt.

Les volumes rejetés sont très variables suivant la combinaison des ennoblissements et des ordres de grandeur comparatifs peuvent être donnés

- fibres acryliques 35 $m^3.t^{-1}$
- laine 70 $m^3.t^{-1}$
- coton 100 $m^3.t^{-1}$
- éponge: 200 $m^3.t^{-1}$

Un rejet de 100 m^3 par tonne de productions variées est un objectif de là profession dans le cadre de la protection de l'environnement

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les charges polluantes dépendent en fait:

- du type de fibres: naturelle ou synthétique,
- des procédés de teintures (au large, foulard, autoclave) et d'impression,
- - des produits utilisés selon leur solubilité dans l'eau (voir tableau 19).

Avec les effluents de prétraitement, les rejets sont plus dilués et caractérisés par les valeurs typiques suivantes

- pH: 4 à 12, le plus souvent basique; 4,5 en laines tricotées; 11 en coton,
- - DCO: 250 à 1500 $mg.l^{-1}$ (50 à 150 $kg.t^{-1}$)
- - $DB0_5$: 80 à 500 $mg.l^{-1}$, avec rapport DCO/DBO_5 en général entre 3 et 5,
- couleur: 500 à 2000 - unités Pt-Co,
- MES: 30 à 400 $mg.l^{-1}$ (peu abondantes, fibre, bourre, duvet), mais pouvant quelquefois atteindre 1000 $mg.l^{-1}$ (cas du coton),
- Cr_{VI} : 1 à 4 $mg.l^{-1}$ et S^{2-} : 0 à 50 $mg.l^{-1}$,
- températures croissantes avec la réduction recherchée des volumes.

5.5.4. Blanchisseries industrielles

Selon leur taille, ces industries peuvent rejeter des charges polluantes élevées et surtout constituées par les produits de lavage mis en oeuvre (carbonate de soude, tripolyphosphate, savons divers, détergents biodégradables, azurants, dérivés du chlore).

Les volumes d'eau résiduaire dans des unités modernes à lavage à contre-courant sont de l'ordre de 2 m^3 par 100 kg de linge et correspondent à 1,5 kg à 2 kg de DBO_5

Le lavage des jeans à partir de pierre ponce (1 kg par kg) peut entraîner des rejets massifs de MES.

Tableau 19. Colorants et rejets de l'ennoblissement textile.

Produits	Soluble eau	Insoluble eau
Minéraux	Acides minéraux Acides organiques (acétique, citrique, formique, tartrique) Oxydants (NaOCl, H_2O_2, borates) Réducteurs	
Colorants	Acides (laines) Basiques Leuco-esters (indigosols) Directs* (coton) Colorants métallifères (Ni, Co, Cr) Colorants au chrome Réactifs*	Pigments et dispersion Au soufre* (pH < 8,5) Azoïques * + Naphtols Noir d'aniline
Produits auxiliaires textiles	Alginate (impression) C.M.C. (impression) Retardateur Détergents	Gommes Amidon

* Ces colorants donnent lieu à de fortes pertes dans les eaux pouvant dépasser 20 Les colorants directs et réactifs sont préparés en saumures de NaCl ou Na_2SO_4.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

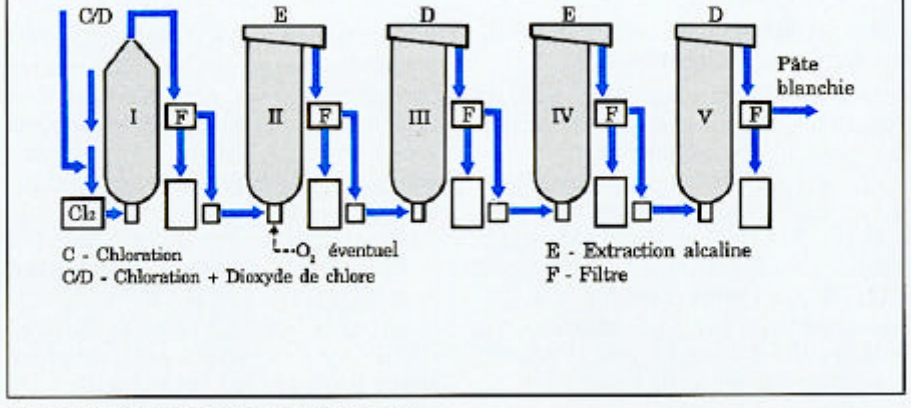


Figure 24. Séquences types de blanchiment.

5.6. INDUSTRIES DE LA PÂTE ET PAPETERIES

Cette industrie comporte deux fabrications, celle de la pâte à papier et celle du papier dont les effluents présentent des pollutions très différentes. Certains établissements peuvent intégrer les deux fabrications.

5.6.1. Fabriques de pâtes à papier

5.6.1.1. Procédés de fabrication

La composition des eaux résiduaires dépend du procédé de fabrication et de la nature des végétaux utilisés (bois, bagasse, paille). Il existe cinq grandes catégories de procédés, dont chacun produit des pâtes écrues ou, plus souvent, des pâtes blanchies. Le blanchiment (fig. 24), qui permet une attaque plus poussée des résidus de la lignine (principalement par dissolution alcaline de chlorolignine), contribue largement à la pollution, comme on peut le constater sur le tableau 20.

- **Les procédés chimiques** permettent l'obtention des pâtes destinées aux papiers fins (impression, écriture).

Le procédé kraft basé sur une cuisson alcaline (NaOH, Na_2S) du bois, dissout 40 à 50% des matières sèches du bois ces matières organiques se retrouvent sous forme de liqueurs de cuisson (liqueurs noires) puis d'eaux de lavage de la pâte. Le blanchiment d'une telle pâte diminue le rendement global de 10 environ et contribue de manière prépondérante à la couleur des effluents.

Le procédé au bisulfite est basé sur une cuisson acide du bois (solubilisation de la lignine par des bisulfites de Ca, Mg, et NH_4) ; une telle pâte est presque toujours blanchie, le rendement global atteignant 50%.

- **Les procédés "mi-chimiques"** combinent une action chimique et une action mécanique: le plus connu est le NSSC (Neutral Sulphite Semi Chemical), dont le rendement est de 75%.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 20. Paramètres de pollution par tonne de pâte

Procédés	**Consommation d'eau** m^3 part	**DB0**5 * kg par t	**MES** kg par t	**Couleur Pt-Co** kg par t
Mécanique	30 - 50	15 - 30	10 - 30	-
Bisulfite				
-écrue	40-60	25-50	10-110	10
- blanchie	50 - 100	40 - 80	20 - 50	75
Kraft				
-écrue	40-60	8-20	10-20	20-50
- blanchie normale	80 - 90	20 - 40 **	10 - 40	100 - 240
- blanchie OZ pur		10 - 20		
CMTP				
-blanchie	10 - 30	30 - 60	10 - 20	-

Remarques

*Rapports DCO/DBO5 variables de 6 à 2,5 suivant le type de bois.

** Valeurs tenant compte d'une récupération complète de la liqueur noire.

Apport prépondérant de DCO et couleur par la phase extraction alcaline du blanchiment

5.6.1.2. Eaux résiduaires

- **Les procédés mécaniques et thermomécaniques** (TMP) du bois présentent des rendements de 90 à 95 %, et sont employés pour la fabrication de pâte destinée au papier journal.

Le nouveau procédé CTMP permettant la fabrication des pâtes destinées à l'élaboration de papier impression écriture a un rendement d'extraction élevé (90 %). Il consomme moins d'eau mais plus d'énergie et n'émet pas de gaz malodorants.

5.6.1.2. Eaux résiduaires

Les liqueurs noires sont généralement traitées séparément (évaporation, incinération ou récupération).

Dans une usine moderne on distingue trois origines d'effluents

- blanchiment,
- lavage et vidanges,
- condensats d'évaporation.

.

Les effluents résultants présentent les caractéristiques suivantes

- débit très important: entre 30 m^3 par tonne (pâte mécanique) et 150 m^3 par tonne (pâtes chimiques),
- pollution insoluble importante (fibres et fibrilles, $CaCO_3$, argiles) caractérisée par une teneur non négligeable en matières "indécantables" (de l'ordre de 10 à 30 % des MES),
- pollution soluble variable suivant les procédés:
  - DBO_5: entre 100 et 1000 $mg.l^{-1}$
  - DCO: entre 300 et 4000 $mg.l^{-1}$ (biodégradabilité très dépendante de la nature du bois: pins, feuillus).
  - Couleur: importante et réfractaire aux procédés biologiques.

Le tableau 20 donne, pour des usines nouvelles des valeurs typiques de pollution ramenées à la tonne de produit fini.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Condensats d'évaporation de liqueur noire**.

Des effluents précédents, on peut traiter séparément les condensats d'évaporation des liqueurs noires qui sont des sources de pollution concentrées. Ils peuvent constituer moins de 10 % du volume de rejets, mais en apportant 30 à 50 % de la DBO5 Ces condensats peuvent présenter les caractéristiques suivantes

Caractéristiques		Pâte bisulfite	Pâte kraft
pH		1,8 - 2,2	8 - 9
DCO	$g.1^{-1}$	4 - 10	4 - 7
DBO	$g.1^{-1}$	2 - 5	1 - 2
S02	$g.1^{-1}$	0,2 - 2	0,4 - 1
Acétate	$g.1^{-1}$	2,5 - 4	
Méthanol	$g.1^{-1}$	0,2 - 1,2	
Acide formique	$g.1^{-1}$	0,15 - 0,5	

- **Conditions de rejet**

Dans l'industrie des pâtes, les normes d'épuration sont fréquemment exprimées par rapport à la masse de matière produite (voir tableau 21).

Il est aussi fréquent de rencontrer des normes relatives à la couleur qui s'expriment le plus souvent en rendement de décoloration.

D'une façon générale, les rendements d'élimination de DCO et de couleur sont liés l'un à l'autre et des performance élevées sont difficiles à atteindre de façon économique.

Tableau 21. Papiers et cartons: normes françaises de rejet pour installations nouvelles (en kg par tonnes). Instructions techniques du 3 janvier 1989.

Composition du papier ou du carton	Sans charge		Avec produit de charge ou produit de couchage	Avec charge et produit de couchage
	Critère	Mensuel	Mensuel	Mensuel
		Classe 1	Classe 2	Classe 3
Plus de 90 % de fibres neuves	MES	0,7	0,7	0,7
	DBO_{5eb}	0,7	1	1,4
	DCO_{eb}	2,5	3	3
		Classe 4	Classe 5	Classe 6
Plus de 90 % de fibres de récupération	MES .	0,7	0,7	0,7
	DBO_{5eb}	1	1,4	1,8
	DCO_{eb}	3	4	4

Nota: eb : mesurée sur l'eau sans décantation préalable de l'échantillon. Un rejet maximal journalier est toléré égal à deux fois le rejet maximal mensuel.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.6.2. Fabriques de papiers et carton.

Fabrication: Le papier est fabriqué à partir de pâte neuve, de vieux papiers désencrés ou non, ou de chiffons.

L'utilisation de ces matières premières, séparées ou mélangées assure une production allant des papiers *fins* aux papiers d'emballage et au carton ondulé.

Selon les qualités désirées, différents adjuvants et produits de couchage peuvent être ajoutés

- charges minérales: kaolin, $CaC0_3$, talc, TiO_2,
- charges organiques (amidon, latex),
- colorants, sulfate d'alumine, agents de rétention.

Le désencrage peut être effectué de deux façons

- par contre-lavage avec un débit important d'eau,
- par flottation mécanique, à de moindres débits mais avec davantage de réactifs (soude, silicate de sodium, acides gras, détergents non ioniques) et avec énormément de matières en suspensions rejetées.

Lors de l'utilisation de vieux papiers, certains déchets particuliers tels que agrafes, plastiques, rubans, se retrouvent aussi dans les eaux à traiter.

Les effluents sont donc caractérisés par une charge variable en fibres et en additifs en général peu solubles.

Les machines modernes sont équipées pour la plupart de deux circuits internes (voir figure 2 5)

- un **circuit primaire** dit court permettant la réutilisation immédiate des eaux égouttées de la table, riches en **fibres,**
- **un circuit secondaire** qui reçoit les eaux des caisses aspirantes, presses et rinçages et sur lequel est en général placé un récupérateur de fibres (ramasse-pâte).

Le **circuit** extérieur à la machine ou ter**tiaire** reçoit les eaux excédentaires du circuit secondaire et les eaux auxiliaires.

Sur ce circuit est situé le traitement général à partir duquel peut être organisé, suivant la qualité du papier fabriqué, le recyclage en fabrication des eaux ou des boues. Ce recyclage peut concer- 101 ner jusqu'à 100 % des boues et 50 à 100 % des eaux dans le cas d'une usine utilisant des vieux papiers. Le choix des taux de recyclage pratiquables repose sur une grande compétence en papeterie et traitement d'eau.

La DCO de ces effluents est, en général, deux à trois fois plus importante que la DBO_5

La concentration en pollution organique dissoute est particulièrement élevée dans le cas de fabrication à partir de vieux papiers.

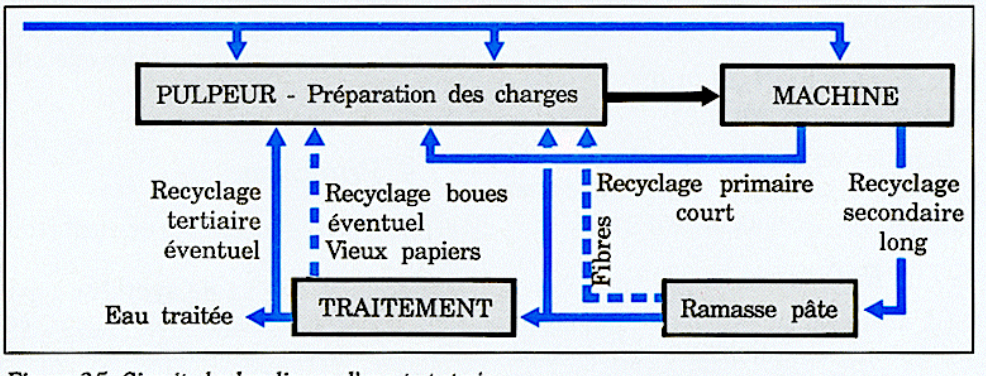


Figure 25. Circuits hydrauliques d'une papeterie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le tableau 22 donne les caractéristiques de pollution des circuits "tertiaires". Tableau 22. Paramètres de pollution par tonne de papier et carton (avant station d'épuration).

Type de fabrication	**Consommation d'eau** m^3 par t	**MES** kg par t	**$DB0_5$** kg par t
Papier journal	20 - 30	8 - 20	2 -4
Papier magazine	20 - 30	10 - 20	2 - 5
Papier impression-écriture	30 - 50	12 - 25	3 - 6
Papier emballage kraft	10 - 20	8 - 15	1 - 3
Carton plat (à partir de pâte neuve)	20 - 30	2 - 8	2 -5
Papier pour ondulé	3 - 15	10 - 2 5	5 - 12
Papiers fins et spéciaux	Très dépendants des types fabriqués		

5.7. INDUSTRIES DU PÉTROLE

On peut définir quatre groupes d'activités susceptibles de produire des effluents spécifiques

5.7.1. Production du pétrole

Les rejets en sont les eaux de formation et les boues de forage. L'activité "offshore" impose des contingences étroites d'implantation.

5.7.2. Transport du brut et des produits raffinés

Dans les terminaux, on doit traiter les eaux de déballastage des pétroliers et quelquefois les eaux de nettoyage.

5.7.3. Raffineries

On distingue les raffineries simples et les raffineries complexes comprenant une unité de vapocraquage et souvent aussi une unité de fluocraquage qui accroissent les volumes de rejet et les pollutions. De faibles débits de soudes usées représentent alors un flux polluant considérable (soude, S^{2-}, RSH, phénols).

Dans ces trois groupes, la pollution provient principalement des hydrocarbures (voir tableau 23.)

La proportion de la pollution dissoute organique (composés oxygénés, phénols, aldéhydes) se développe avec le craquage tandis que le raffinage croissant de bruts lourds et sulfureux augmente les rejets de sulfures.

5.7.4. Pétrochimie

Trois types de complexes existent (voir figure 26)

- **complexes de gaz de synthèse** reposant sur le reformage à la vapeur, en développement (y compris les synthèses de NH3 et de méthanol),

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 23. Production et raffinage. Caractéristiques de principaux effluents.

Origine	**Volume d'eau** en % **du pétrole traité**	**Hydrocarbures** en $mg.l^{-1}$	**Autres polluants**
Production: eau gisement	0 à 600	200 à 1000 après séparateur triphasique	NaCL, sables argiles
Forage: résidus et boues			Sels, bentonite, lignosulfonates
Transports: - Eau de ballast - Nettoyage des pétroliers	(25 à 30% de la capacité du pétrolier)	Après stockage moyenne 50 - 80 paraffines-cires 500 - 1000 émulsions	NaCl, sables Détergents Alcalinité
Raffinage **Dessaleur** **Fluo-craquage** **catalytique FCC** **Eaux pluviales** **Condensats distillation,** **atmosphérique** **Condensats distillation** **sous vide**	**5 - 6** **6 - 10** **2 à 2,5** **1 à 1,5**	**50 - 150** **HC légers** **100 - 150** **Variable** **50** **150**	**NaCI, phénols** **éventuel. S^{2-}** **S^{2-}, RSH, phénols** **NH_4^+, F^-** **Sables** **Phénols, NH;** **Phénols, NH'**
Autres sources		Polluants en $mg.l^{-1}$	
Soudes usées de désulfuration F.C.C.: soudes phénoliques Unités merox vapocraqueurs soudes sulfureuses		phénols : 10 - 60 RSH, HC : 0,3 - 5 $S2^{2-}$: 20 - 80 RSH : 0,3 - 10 phénols : 0,2 - 2	
Huiles lubrifiantes: Extractions aromatiques et non paraffiniques		Furfural Méthyl-Ethyl-Cétone	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **complexes oléfiniques,** les plus connus, reposant sur le vapocraquage de naphta, de gazole ou de pétrole.
- complexes aromatiques, reposant sur le reformage catalytique, avec synthèses des BTX et leurs dérivés.

La production des polymères est en général effectuée sur des sites distincts de ceux des complexes précédents, sauf dans le cas du polyéthylène et quelquefois du polypropylène.

Les effluents sont pollués par les matières premières, des solvants, des catalyseurs et les polymères eux-mêmes en suspension ou en émulsion.

De forts rejets de sels minéraux sont constatés avec:
- NaCl quand il y a synthèse de composés chlorés (PVC et solvants),
- $CaCl_2$ dans le cas de l'oxyde de propylène et aussi de l'oxyde d'éthylène,
- $(NH_4)_2SO_4$ dans le cas du caproloctame et des acrylates.

Les rejets de $AlCl_3$ correspondent aux réactions d'alkylation développées en raffinage (essences) et en production d'éthylbenzène et de cumène (avec acidité H_3PO_4).

Le tableau 2 4 donne la nature des principaux polluants organiques de diverses fabrications.

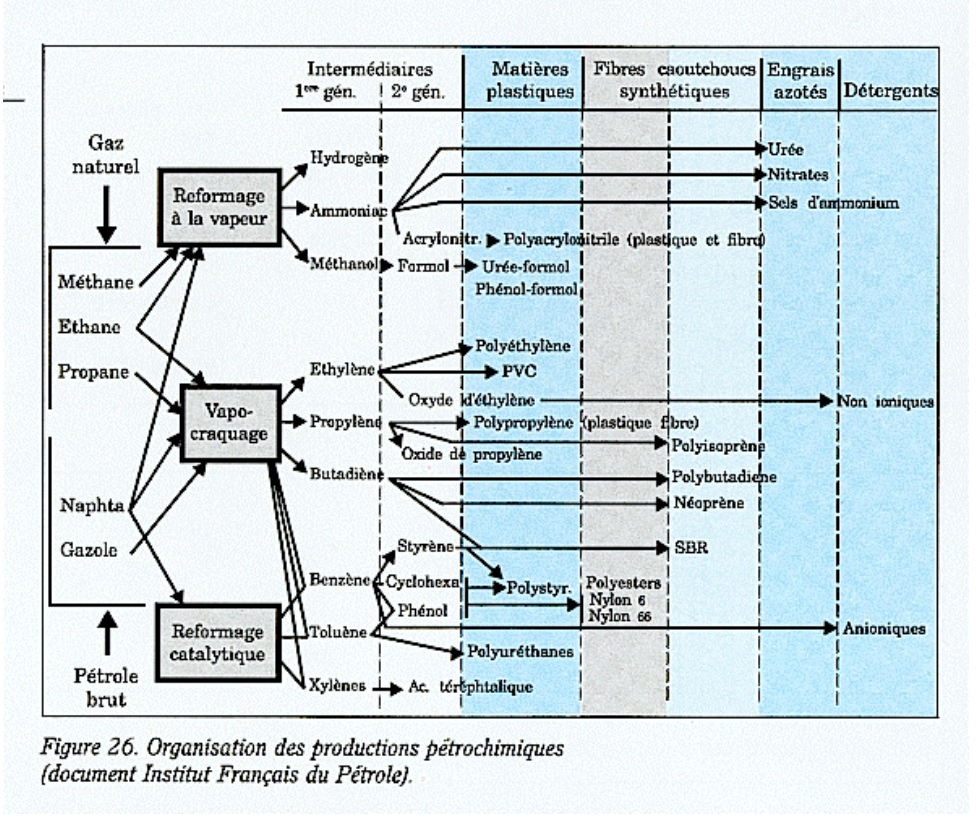


Figure 26. Organisation des productions pétrochimiques (document Institut Français du Pétrole).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 24. Principales productions pétrochimiques et polluants correspondants.

	Produits/procédés	Pollution organique dissoute	Autres pollutions
Vapo-craquage	Ethylène, propylène butadiène	Phénols acides organiques	S^{2-}, RSH Hydrocarbures
Chimie du gaz de synthèse	Méthanol (Vaporeformage de naphta et oxydation partielle)	Méthanol, alcools lourds	
	Urée	$CO(NH_2)_2$ $(CONH_2)_2NH$	Urée 1 à 10 $g.l^{-1}$ NH_4OH 0,1 à 0,5 $g.l^{-1}$
	Traitement des coupes oléfiniques C4 et C5		
	MTBE (éthérification isobutène)	Méthanol, isobutène	
	MEC (hydratation butène l)	Butanol	Acidité sulfurique catalyseurs
Intermédiaires oxydés ou chlorés	Oxyde d'éthylène (oxydation directe de l'éthylène)	Ethylène glycol, acétaldélyde, CO_2, hydrocarbures	Hydrocarbures
	Oxyde de propylène (chlorhydrine)	Dichloropropane, éther di-isopropylique	Eaux alcalines, $CaCl_2$ boues de $CaCO_3$
	Butanol tertiaire TBA	Oxyde de propylène isobutane, acétone	
	Acétaldéhyde (oxydation éthylène)	Acétaldéhyde, acide acétique, oxalate	Eaux acides
	Acide acétique (oxydation d'acétaldéhyde méthanol, Co)	Acide formique, acétates, acétone	Eaux acides, iodures, rhodium
	Phénol (oxydation du cumène)	Benzène, cumène	Bentonites, $AlCl_3$ hydrocarbures
Monomères vinyliques	Acétate de vinyle (à partir d'acétylène)	Acétaldéhyde, acétone acroléine, $FeCl_3$	
	Chlorure de vinyle (chloration de l'éthylène)	Dichloroéthane	HCl, NaCl, hydrocarbures
	Acide acrylique, acrylates, métacrylates (oxydation du propylène)	Acide acétique acroléine	Catalyseurs $(NH_4)_2$ SO_4
	Acrylonitrile (ammoxydation du propylène)	CN^-, acétonitrile	Catalyseurs, $(NH_4)_2$ SO_4

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 24. (Suite.)

	Produits	Polluants organiques principaux	Autres pollutions
Monomères vinyliques	Caprolactame (nylon 6) via hydroxylamine	Cyclohexane, lactame amine, hydroxylamine	$(NH_4)_2$ SO_4 Dominante acide
	Acide adipique	Cyclohexane, benzène	Nitrates, NaOH
	Acide téréphtalique (oxydation propylène)	Acide acétique Acides aromatiques, xylène	Catalyseurs
	Polyéthers Polyols	Polyéthylène glycol Polypropylène glycol	
Monomères Elastomères	Butadiène (déshydrogénation butane)	Hydrocarbures oléfiniques	
	Néoprène, polychlroprène	Dérivés chlorés	
	Styrène (déshydro-génation éthylbenzène	Benzène, éthylbenzène	$AlCl_3$ Huiles, diatomées
Polymères et résines	Polyesters : – Fibres – Résines	Acide téréphtalique, Ethylène glycol, Acide adipique, maléique éthylène glycol	Dominante acide
	Polyéthylène : – PE BD – PE HB		Huiles, parasites, Poussières PE, Catalyseurs
	Polypropylène (voie sèche)	Hexane, détergents non ioniques	Acidité légère, Al^{3+} Ti^{4+}, Poussières/pigments
	Polystyrène	Styrène	Forte acidité, NaCl, H_2PO_4, Poussières PS, détergents
	P.V.C	Méthanol, Acétate P.V.	Acidité forte, acide polyvinylique, particules très fines PVC
	Caoutchoucs : – S.B.R. – Polybutadiène	Styrène et butadiène Butadiène acrilonitrile, composés oxygénés	Savons, catalyseurs, Al^{3+}, latex coagulé, catalyseurs Ti^{4+}, NH_4^+, latex
	Résines époxy	Epichlorhydrine, phénols aromatiques	
	Résines acryliques	Diméthyl métacrylates	CN^-
	Résines polyuréthanes	Di-isocyanates et polyéther-polyols, polyesters–polyols	
	Résines phénoliques	Acétadéhyde, formaldéhyde, phénols	H_2SO_4, détergents non ioniques

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.8. SIDÉRURGIE

On distingue quatre groupes d'activités: les uns (cokerie, décapage) donnent des effluents à forte pollution dissoute et donc non recyclables après traitement (tableau 25) ; les autres (laminage et lavage de gaz) des effluents à forte pollution en suspension (oxydes, MES, hydrocarbures insolubles) et qui sont pour leur quasi totalité recyclables (tableau 26).

5.8.1. Cokéfaction

Elle génère des eaux ammoniacales qui proviennent de l'humidité du charbon (8 %) et d'eau de formation (4 %). Ce sont les eaux ammoniacales faibles, riches en phénols. Le lavage du gaz génère lui-même les eaux ammoniacales fortes, riches en NH, libre.

5.8.2. Décapage

Le décapage produit des eaux de rinçage très chargées en Fe^{2+} et en H^2SO_4 s'il est sulfurique. S'il est chlorhydrique, la régénération thermique de HCl peut supprimer une grande partie des rejets d'acidité et de fer dissous. La lubrification des cages à haut taux de réduction est productrice de rejets alcalins riches en graisses animales ou végétales. Il en est de même du dégraissage électrolytique avant étamage. L'arrosage des cages à bas taux de réduction est effectué par des fluides aqueux (huiles solubles conventionnelles en général) dont une faible fraction est à traiter à l'état de purges.

5.8.3. Lavage de gaz

Il concerne le bouletage l'agglomération, les hauts fourneaux, la réduction directe et les aciéries. La pollution est principalement constituée par les matières en suspension, sauf dans certains procédés de réduction directe et de granulation de laitier. Dans la presque totalité des usines, les circuits sont servi-ouverts et de faibles purges demeurent à traiter.

5.8.4. Laminage

Depuis la coulée continue de l'acier et l'écriquage des brames, jusqu'à l'élaboration des produits (trains à bande, trains à profilés, trains quarto, trains à fil, laminoirs à tubes) l'eau intervient dans toute une série d'opérations mécaniques (décalaminage, granulation, aspersion). Elle entraîne des oxydes (battitures) ou du laitier auxquels peuvent s'ajouter de petites quantités d'hydrocarbures provenant de la lubrification des cages ou de l'acier.

La présence d'une pollution dissoute est exceptionnelle (fuites de fluide hydraulique de coulée continue). Tous ces circuits peuvent donc être semi-ouverts avec une faible purge de déconcentration à traiter.

Les eaux d'appoint d'un complexe sidérurgique bien équipé en recyclage peuvent représenter 3 à 6m^3 d'eau par tonne d'acier, compte tenu d'un facteur global de concentration de 3 à 4 et le volume total des effluents des circuits semi-ouverts est alors de 1 à 1,5 m^3 par tonne acier.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 25. Effluents spécifiques sidérurgiques
(non recyclables par des moyens simples et économiques)

	Atelier	Volume 1 par t coke	Principaux polluants
Cokerie	Eaux ammoniacales* faibles EAf	110 à 160	Goudrons Phénol 1 – 4 $g.l^{-1}$ NH_4^+ libre 2 – 6 $g.l^{-1}$ NH_4^+ fixe 0,5 – 4 $g.l^{-1}$ H_2S, CN^-, SCN
	Eaux ammoniacales fortes EAF	30 à 60	NH_4^+ libre 8 – 14 $g.l^{-1}$ HCO_3^- 1 – 4 $g.l^{-1}$ S^{2-}
	Ateliers sous-produits et purge condensation finale	10 à 100	Phénol 0 – 50 $mg.l^{-1}$ CN^- 100 – 400 $mg.l^{-1}$
	Purge dépoussiérage enfournement charbon	50 à 300	MES
Laminage à froid**		m^3 par t acier	
	Décapage H_2SO_4 Décapage HCl	2 0,1	Fe^{2+} 50 – 300 $mg.l^{-1}$
	Laminage haut taux de réduction	1	MES 0,2 $g.l^{-1}$ Huiles 0,4 – 0,6 $g.l^{-1}$ DCO 0,7 – 1,2 $g.l^{-1}$
	Dégrais. électrolyt. avant étamage	1,5 à 2	MES 0,5 à 1 $g.l^{-1}$ Huiles 0,1 – 0,2 $g.l^{-1}$ DCO 0,3 – 0,5 $g.l^{-1}$ Silicates

* La salinité des EAf dépend de la richesse en Cl^-, quasi-nulle dans les charbons sud-africains et considérable dans les charbons sarro-lorrains.

** Dans le premier cas, ces eaux seront recyclables. Pour mémoire, électro-zingage, chromage, étamage (voir page 110).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 26. Purge des circuits sidérurgiques dont les effluents sont recyclés

Atelier	**Origine**	**Volume Spécifique** 1 par t	**Polluants** ($mg.l^{-1}$)	
1. Lavage de gaz				
Hauts fourneaux	Purge circuit lavage de gaz ou filtrat des boues	50 - 300	Poussières NH_4^+ CN^- Zn^{++}, Pb^{++}	200 - 1000 0 - 500 0 - 20 5 - 20
	Granul. de laitier	200 - 500	S^{2-}, S_20_3 $Si0_2$- Claine	0 - 600 100 - 400
Réduction directe	Lavage et refroidissement gaz	500	NH_4HCO_3 $KHCO_3$ SO_2/SO_3 MES OXYDES	500 - 5 000
Aciéries à oxygène	Purge circuit ou filtrat des boues	20 - 100	$CaC0_3$ $Ca(OH)_2$ ou K_2CO_3 Oxydes	1000 - 5 000
2. Laminage et granulation				
Coulée continue	Purge du circuit ou eau de lavage des filtres	50 - 100	Fines - HC - Fluide hydraul. F-	
Écriquage de brames		20 - 50	Fines - laitier	
Trains à fil		100 - 200	Fines - HC	
Laminoirs à tubes		50 - 100	Fines	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.9. INDUSTRIE AUTOMOBILE ET AÉRONAUTIQUE

Suivant les finalités des usines, les rejets sont et concernent:

- les purges de fluides de coupe aqueux,
- les effluents de décapage et dégraissage,
- les éluats de déminéralisation,
- les purges de machines à laver,
- les purges de cabines de peinture,
- les purges des circuits de réfrigération,
- les effluents généraux (sanitaires et lavage de sol).

Par ailleurs, les centrales d'usinage, les ateliers de peinture, les machines à laver comportent des circuits fermés pouvant véhiculer jusqu'à 500 à 1000 $m^3.h^{-1}$ d'un liquide dont il faut maintenir la qualité en permanence sur totalité ou partie du débit. La figure ci-contre définit les différents postes intéressés.

5.10. INDUSTRIES DES TRAITEMENTS DE SURFACE

- **Origine et nature des rejets**

Les traitements de surface concernent avant tout les pièces métalliques, mais aussi certaines matières synthétiques.

Ils mettent en œuvre

- une préparation préalable de la surface (dégraissage, décapage),
- une déposition pa voie galvanoplastique,
- une déposition par voie chimique.

Ces opérations doivent elles-mêmes être suivies de rinçage courant.

L'ensemble des effluents doit être séparé en trois catégories (figure 28)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

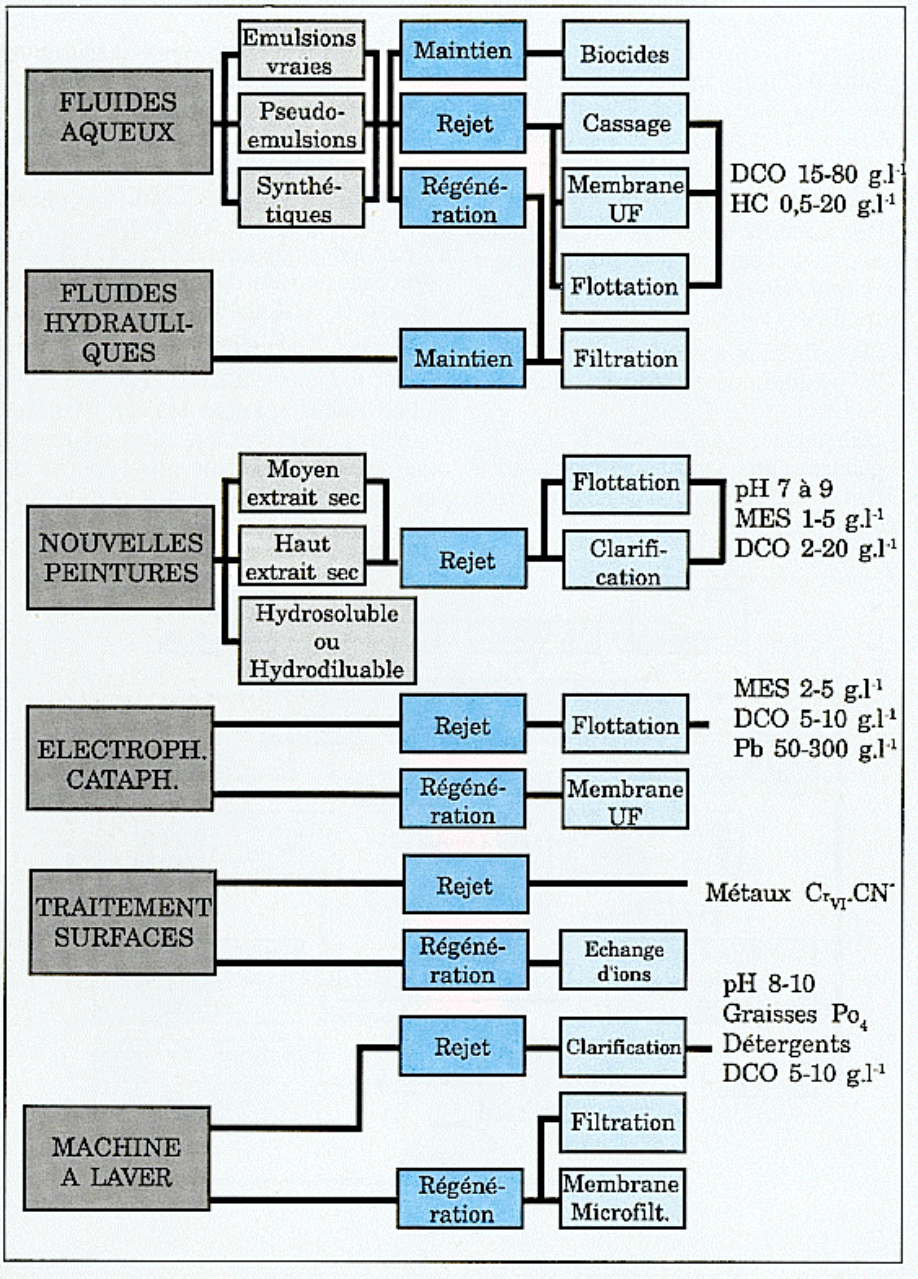


Figure 27. Entretien de bains et rejets dans l'industrie automobile.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- bains usés concentrés,
- eaux de lavage moyennement concentrées en produits susceptibles de précipiter (savons, graisses, sels métalliques),
- eaux de rinçage diluées et éventuellement recyclables après traitement.

Pour sécurité et pour faciliter le traitement, on doit séparer les effluents acides et chromatés des effluents alcalins et cyanurés.

- **Classification des polluants**

La pollution se répartit en plusieurs familles :

- polluants toxiques tels que CN^- ; Cr_{VI} F^-,
- polluants provoquant une modification du pH, c'est-à-dire produits à fonction acide ou basique,
- polluants dont la présence augmente la teneur en MES, comme les hydroxydes, les carbonates et les phosphates,
- polluants qui font l'objet d'une réglementation particulière, S^{2-}, Fe^{2+}
- polluants organiques (EDTA, etc.), provenant en particulier du dégraissage.

Tous les composants des bains se retrouvent dans les eaux de rinçage, qui peuvent également contenir des ions métalliques provenant de l'attaque des pièces traitées.

5.10.1. Conditions de rejet

Les législations sont très variables suivant les pays et évoluent rapidement vers une sévérité croissante, aussi bien en ce qui concerne les concentrations en polluants que les débits de rinçage.

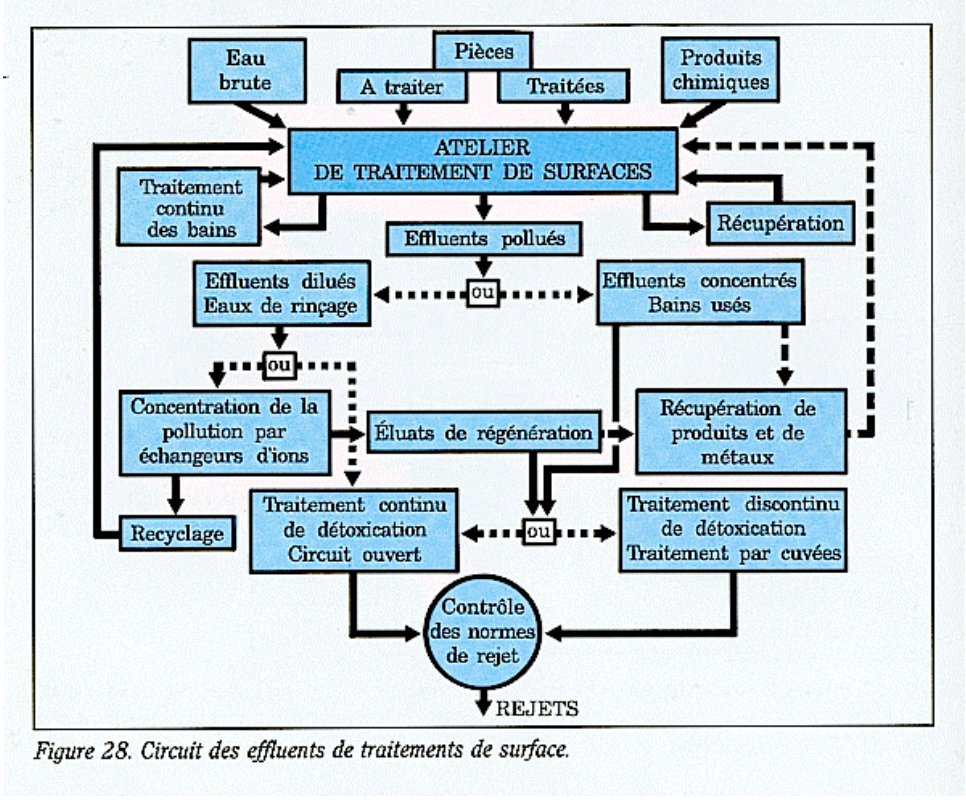


Figure 28. Circuit des effluents de traitements de surface.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

En France, par exemple (décret du 8 novembre 1985)

- Volume d'effluent limité à 81 par m^2 de surface traitée pour chaque fraction de rinçage
- Métaux: Zn + Cu + Ni + AI + Fe + Cr + Cd + Pb + Sn < 15 $mg.l^{-1}$,

Avec en particulier, les seuils suivants à ne pas dépasser ($mg.l^{-1}$)

Cr_{VI}	……	0.1	Zn	……	5.0
Cr_{III}	……	3.0	Fe	……	5.0
Cd	……	0.2	Al	……	5.0
Ni	……	5.0	Pb	……	1.0
Cu	……	2.0	Sn	……	2.0

D'autres métaux et métalloïdes sont susceptibles d'être mis en oeuvre dans les ateliers (zirconium, vanadium, molybdène, argent, cobalt, magnésium, manganèse, titane, béryllium, silicium...) peuvent faire l'objet de limites particulières.

Remarques

1) Dans le cas des ateliers où sont mis en oeuvre plus de cinq métaux (dont le fer et l'aluminium), la norme de 15 $mg.l^{-1}$ peut dans certaines conditions être portée à 20 $mg.l^{-1}$.

2) Cas particulier du cadmium. Les rejets de cadmium sont non seulement limités par une norme de concentration, mais aussi par une norme de flux massique: moins de 0,3 g de Cd rejeté par kg Cd utilisé.

3) Seuils des autres polluants en $mg.l^{-1}$

MES	……	30.0	P	..	10.0
CN	……	0.1	DCO	..	150.0
F	……	15.0	Hydrocarbures		
Nitrites	……	1.0	totaux	..	5.0

4) Certains aménagements sont tolérés pour le respect des normes relatives à F, PO_4^{2-} et DCO. La mise en oeuvre de la meilleure technique disponible et économiquement réalisable sera définie cas par cas.

La prévention de la pollution et la récupération de ces produits sont essentielles pour atteindre économiquement les seuils de détoxication imposés.

5.10.2. Prévention

Elle a pour but de diminuer les émissions de polluants au niveau de l'atelier par

- diminution des entraînements (géométrie des montages, accrochage des pièces, amélioration des temps d'égouttage),
- modification des caractéristiques des bains.

5.10.3. Récupérations

- **Eau**

On tend à récupérer et valoriser si possible un certain nombre de pertes habituelles.

La rationalisation de l'utilisation de l'eau dans les ateliers est primordiale. Pour un travail donné et à qualités de rinçage et de fabrication égales, des structures de rinçage permettent des économies importantes par

- des rinçages statiques ou de récupération,
- des rinçages en cascade, éventuellement recyclables sur échangeurs d'ions.

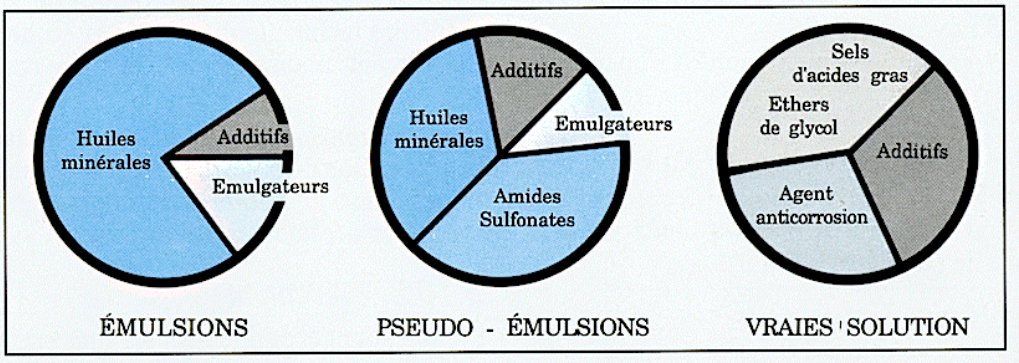
- **Matières premières**

Leur récupération "in situ" est possible par :

- traitement par membranes (sels de Ni, de Cu ou d'autres métaux),
- échange d'ions (sels de chrome, acide des bains de décapage),
- électrolyse (Cu, Zn, Cd, Ag).

Cette voie en développement est la meilleure sur les plans de l'économie et de l'environnement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



Les trois familles de fluides de coupe aqueux.

5.11. FLUIDES DE COUPE AQUEUX

Ils sont mis en oeuvre dans les industries mécanique, automobile et aéronautique et dans les laminoirs.

Le rejet de ces fluides quelquefois appelé huiles solubles ou huiles de coupe, qui contiennent 90 à 97% d'eau et présentent une forte DCO pose un problème de traitabilité difficile, car ils peuvent contenir divers composés organiques non biodégradables ni floculables. Il importe donc de bien identifier les trois familles possibles (voir ci-dessus et tableau 27).

Ces fluides circulent grâce à des centrales de capacité de 10 à 500 $m^3.h^{-1}$. Ils sont détériorés par les pollutions suivantes

- poussières métalliques et oxydes,
- huiles étrangères ou parasites,
- matières organiques oxydées ou polymérisées,
- boues biologiques et acides organiques de fermentation.

Ils doivent être régénérés (réduction des MES et huiles étrangères) et stabilisés en circuit fermé: les volumes rejetés à épurer sont eux-mêmes variables de quelques $m^3 h^{-1}$ à quelques $m^3.j^{-1}$.

Tableau 27. Caractéristiques des fluides de coupe aqueux.

Type	**Composition**	**Richesse en soluté**	**Densité optique**	**DCO $mg.l^{-1}$**
Emulsions vraies	Huiles minérales dispersées + émulgateurs (15 à 20 % des huiles)	5 – 15%	20 - 150	50 -100
Fluides semi-synthétiques ou semi-émulsions	Huiles minérales, émulgateurs, détergents non ioniques, sulfonates, amides d'acide gras	3 – 6%	1 - 20	40 - 50
Fluides synthétiques ou solutions vraies	Sels d'acides gras à courte chai ne et acrylsulfamidô-carboxyl, polyéthers de glycol	3%	< 1	40 - 50
Additifs communs possibles				
• Agents anti-corrosion et antimousse				
• Bactéricides et fungicides, colorants				

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.12.
ÉNERGIE

Tableau 28. Effluents principaux liés à la production d'énergie.

Énergie	Origine des rejets	Pollutions
Centrales Thermiques	Stockage fuel	Hydrocarbures, MES
	Nettoyage réchauffeur d'air Nettoyage chaudières	Bains alcalins oxydants, Fe Vd Ni Cu Acide citrique, NaF ou H_2SO_4 -NH_4F
	Décendrage - Transport cendres volantes et laitier	MES, alcalinité $Ca(OH)_2$ ou KOH acidité SO_2 rarement $Ca(OH)_2$
Lavage de fumées	Désulfuration : ELG NO_x Élimination NO_x	Acidité HCl + H_2SO_4 - métaux lourds, H_2SO_3 Gypse, HCOOH, NH_4^+, forte salinité
Gazéification Charbon	Eaux de formation et ELG 1re génération gazéifieur 2e génération	 Phénols, NH_4^+, CN^-, SCN, Acides, goudrons NH_4^+, CN^-, SCN, HCOOH, hydantoïnes
Charbonnages	Lavoirs	MES 10 - 100 $g.l^{-1}$
Incinération Ordures ménagères	ELG	HCI, Cl^-, SO_2^{2-} métaux lourds
Centrales nucléaires PWR	Buanderie, lavage de sols, laboratoires Prises d'échantillons Purge du générateur de vapeur (APG)	Radioactivité < 10^{-3} $Ci.m^{-3}$ à réduire 2.10^{-5} $Ci.m^{-3}$ Sels, MES APG :radioactivité très accidentelle
Retraitement combustibles irradiés	Effluents susceptibles de traitement par précipitation chimique ou adsorption Effluents à risques ou de faible activité Effluents de moyenne activité Piscines de stock. combustibles	 Colloïdes, activité < 10^{-5} $Ci.m^{-3}$ 10^{-5} à 1 $Ci.m^{-3}$ Sr_{90}, Cs_{137} sels 10^{-3} $Ci.m^{-3}$: peu de sels

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.13. MÉTALLURGIE ET HYDROMÉTALLURGIE

Tableau 29. Effluents principaux de métallurgie et hydrométallurgie.

Fabrication	Origine des rejets	Pollutions
Aluminium	ELG électrolyse cryolithe	Acidité SO_2 HF, poussières de C et cryolithe
	Broyage brasques	F^- et CN^-, poussières de C
	Fabrication anodes précuites	Acidité, $A1^{3+}$, F^-, goudrons
	Refroidissement coulées en lingotières	Kaolin et graisses
Or (Hydro-métallurgie)	Procédé au cyanure	NaOH, CN^-
	Procédé à la thio-urée	H_2SO_4 Fe^{2+}, thio-urée
Uranium (Hydro-métallurgie	Eaux d'exhaure des mines	Eaux généralement acides, riches en sulfates et métaux dissous (Fe, Ur). Quelquefois radioactivité 50 à 100 pico curies (Radium 226)
	Extraction par échange d'ions ou solvants	Raffinats légèrement acides ($S0_4^{2-}$) et radioactifs (radium), solvants
	Atelier des boues stériles	MES
Zinc Métallurgie	Grillage et réduction: ELG	Eaux légèrement acides - Zn, Pb, Cd, quelquefois Hg et Se.

Dans ces industries, présence d'eaux d'exhaure de mines acidifiées et sulfatées par oxydation biologique des sulfures présents.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.14.
CHIMIE GÉNÉRALE

Tableau 30. Effluents de la chimie générale.

Fabrication	Origine des rejets	Pollutions
Industrie du chlore(cellules à Hg)	Lavage de gaz et des sols Pertes de saumure	Pollution essentielle par Hg(métal et ions); possibilité de recyclage Hg
NH_3	Condensats 1 m^3 par tonne	1 - 4 $g.l^{-1}$ $NH_4H\,C0_3$, 0,2 - 1 $g.l^{-1}$ méthanol
Synthèse NH_4NO_3	Condensats basiques0,5 m^3 par tonne Lavage ateliers	2 - 3 $g.l^{-1}$ $NH_4\,N0_3$, 0,2 - 0,8 $g.l^{-1}$ NH_4OH NH_4, $N0_3$, MES
Urée	Condensats 0,6 m3 par tonne Lavage sols	Sans hydrolyseur, concentration de 0,1 à 0,5 $g.l^{-1}$ NH_3, 0,5 2 $g.l^{-1}$ urée
Super-phosphates	ELG	Eaux très acides: H_2SO_4, SiF_6H_2, HF, H_3PO_4, gypse Boues volumineuses $Si0_2$, CaF_2 et $Ca_3(PO_4)_2$
H_3PO_4	ELG	
Industrie Pharma-ceutique	Lavages	Pollution organique dissoute souvent élevée. Présence éventuelle antibiotiques et biocides
Colorants	Fabrication	D.N.T, D.N.B., solvants chlorés nitrophénol, nitro-aniline
Détergents poudres lessivielles	Fabrication	ABS-LAS-tripolyphosphates, borates, alcools as sulfatés ou étoxylés, SO_4^{2-}

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.15.
AUTRES INDUSTRIES

Tableau 31. Effluents de diverses autres industries

Fabrication	Origine des rejets	Pollutions
Verrerie et miroiterie	Dépolissage de verre, décoration, façonnage Sciage, polissage, finitions	Acidité élevée: HF, bifluorure d'ammonium Poudres de corindon et de ponce, émeri, oxyde de cérium, grenat
Fibres de verre	Fabrication de fibres, ensimage	Fortes DBO, DCO et MES, dues à dextrine, gélatine, silicones, acétates divers, résines phénoliques
Cosmétiques	Conditionnement	Fortes teneurs en graisse et détergents anioniques et non ioniques. DCO dissoute et facilement biodégradable
Abrasifs sur support	Préparation de mélanges adhésifs	Résines formolphénoliques et urée-formol, gélatines, amidon, résines époxy et solvants Forte DCO, valeurs moyennes de DBO et MES
Céramiques	Essorage des pâtes Lavage des sols	Forte teneur en MES Réactions possibles de cristallisation
Agglomérés de fibres		Fibres de bois Forte DCO dissoute
Colles et adhésifs		Copolymères vinyliques. Colles et gommes, forte DCO, émulgateurs. Possibilité de prise en masse
Pneumatiques	Fabrication des armatures	Fer et cuivre Huiles de graissage, huiles solubles. Effluents du décapage
	Synthèse des gommes	Savons et sels métalliques, solvants
	Confection des pneus	Fluides hydrauliques, graisses

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 31 (suite). Effluents de diverses autres industries.

Fabrication	Origine des rejets	Pollutions
Poudres et explosifs	Fabrication de composés nitrés	Fortes acidités sulfurique et nitrique; coloration et DCO non biodégradable
	Granulation et imprégnation des poudres simple base	Acétate d'éthyle, nitrocellulose, nitroglycérine, Na_2SO_4 colles, plastifiants. Effluents relativement biodégradables
Lavage avions et aéroports	Décapage des peintures	Fortes teneurs en DCO et détergents, silicate, phosphates, acide chromique, huiles graisses, phénols Kérosène

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. LES BOUES

Les éléments polluants et leurs produits de transformation retirés de la phase liquide au cours de tout traitement d'eau, quelle qu'en soit la nature, se trouvent finalement rassemblés dans la très grande majorité des cas dans des suspensions plus ou moins concentrées dénommées "boues":

Le caractère commun de toutes ces boues est de constituer un déchet encore très liquide, de valeur généralement faible ou nulle. Certaines d'entre elles sont chimiquement inertes, mais celles qui proviennent de traitements biologiques sont souvent fermentescibles et nauséabondes.

Toutes les boues de caractère organique nécessitent un traitement spécifique qu'elles soient recyclées, réutilisées ou remises dans le milieu naturel. Il en est de plus en plus de même pour les boues essentiellement minérales.

L'urbanisation et la protection de l'environnement rendent de jour en jour plus difficile le retour pur et simple sans conditionnement préalable de ces produits dans le milieu naturel. Le traitement de la boue est devenu un corollaire inévitable du traitement de l'eau, et il nécessite des moyens techniques et financiers parfois supérieurs.

6.1. CLASSIFICATION

La caractérisation d'une boue est fondamentale pour le choix de la méthode de traitement qui lui est applicable ainsi que pour la prévision des performances des appareils à employer. Le tableau 32 propose une classification des differentes boues en fonction de leur origine et de leur composition.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Chargement d'un camion de boues.

Cette composition dépend à la fois de la nature de la pollution initiale de l'eau et des procédés d'épuration auxquels cette eau a été soumise; traitements physiques, physico-chimiques, biologiques.

- **Classe organique hydrophile:** c'est une des classes les plus étendues. Les difficultés de déshydratation de ces boues sont dues à la présence d'une fraction importante de colloïdes hydrophiles. Se rangent dans cette catégorie toutes les boues résultant du traitement biologique d'eaux résiduaires, et dont la teneur en matières volatiles peut atteindre jusqu'à 90% de la totalité des matières sèches (eaux résiduaires d'I.A.A., de chimie organique, par exemple).
- **Classe minérale hydrophile:** ces boues contiennent des hydroxydes métalliques formés au cours des procédés physico-chimiques par précipitation d'ions métalliques présents dans l'eau à traiter (Al, Fe, Zn, Cr) ou dûs à (emploi de floculants minéraux (sels ferreux ou ferriques, sels d'aluminium).
- **Classe huileuse**: elle est caractérisée par la présence dans les effluents de quantités même faibles d'huiles ou de graisses minérales (ou animales). Ces huiles sont en émulsion ou adsorbées aux particules boueuses hydrophiles ou hydrophobes. Une fraction de boue biologique peut aussi être présente en cas de traitement final par boues activées (exemple: traitement d'eaux résiduaires de raffinerie).
- **Classe minérale hydrophobe:** ces boues sont caractérisées par un taux prépondérant de matières particulaires à faible teneur en eau liée (sables, limons, scories, battitures, sels cristallisés...).
- **Classe minérale hydrophile - hydrophobe:** ces boues comprenant principalement des matières hydrophobes contiennent suffisamment de matières hydrophiles pour que l'influence défavorable de celles-ci en déshydratation deviennent prépondérante. Ces matières hydrophiles sont souvent les hydroxydes métalliques (coagulants). . Classe fibreuse: ces boues sont généralement faciles à déshydrater sauf lorsque la récupération poussée de fibres fait évoluer cette classe vers le type hydrophile, par suite de la présence d'hydroxydes ou de boues biologiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 32. Tableau des différentes classes de boues.

Caractéristique principale de la boue	Origine-Industrie	Traitement de l'eau	Éléments composants
Organique hydrophile	1. ERU	Tous traitements biologiques ou physico-chimiques	Matières organiques prédominantes : $\frac{M.O.}{M.S.}$: 40 à 90 % – Matières protéiniques souvent très fermentescibles – Déchets végétaux ou animaux – Huiles et graisses animales et parfois minérales – Hydroxydes hydrophiles (Al, Fe) en traitement physico-chimique – Hydrocarbures (pétrochimie)
	2. E.R. des I.A.A. • Brasseries • Abattoirs • Transformation de la pomme de terre • Laiteries • Conserveries • Elevage (lisier de porcherie)	2. Décantation et/ou épur. biologique dont : aération prolongée stabilisation aérobie ou digestion anaérobie	
	3. E.R. Industries Textiles, chimie organique, pétrochimie	3. Physico-chimique (floculation-décantation) et éventuellement biologique	
	4. Tout traitement biologique de finition	4. Biologique	
Huileuse hydrophile	1. E.R. Raffinerie	– Déshuilage	– Huiles et graisses minérales
	2. E.R. Ateliers mécaniques (huiles solubles)	– Floculation-décantation-flottation	– Hydrocarbures – Hydroxydes (Al, Fe)
	3. E.R. Laminage à froid	– Biologique (raffinerie)	– M.O. biologiques (éventuellement)
Huileuse hydrophobe	E.R. laminoirs	– Décantation	– M.S. denses et bien décantables (battitures, oxydes Fe) – Huiles et graisses minérales en forte teneur
Minérale hydrophile	1. Rivières peu chargées en MES (barrages) et forages	1. Clarification (floculation-décantation) Déferrisation chimique	1. Boues très hydrophiles avec forte proportion d'hydroxydes métalliques (Fe, Al) pouvant atteindre 60 % sur M.S. Teneur en M.O. variant avec charge en algues, plancton et pouvant dépasser 30 % sur des eaux stagnantes

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 32. Tableau des différentes classes de boues. (suite).

Caractéristique principale de la boue	Origine-Industrie	Traitement de l'eau	Éléments composants
Minérale hydrophile	2. Rivières moyennement chargées (30 – 70 $mg.l^{-1}$)	2. Clarification (floculation-décantation)	2. Teneur en hydroxydes de 20 à 30 % + éventuellement charbon actif en poudre (10 – 15 %)
	3. Rivières en crue et rivières avec apport d'argiles ou de limons à tendance hydrophobe	3. Clarification	3. Hydroxydes (15 à 20 %) Argiles ou limons (25 à 60 %)
	4. Rivières et forages	4. Décarbonatation partielle	4. $CaCO_3$ (50 à 55 %) Hydroxydes Fe et Al (20 à 30 %) M.O. (10 à 20 %)
	5. E.R. de traitement de surface • décapage • anodisation • galvanoplastie • peinture	5. Neutralisation + floculation-décantation Détoxication (CN^-, Cr_{VI}) + floculation-décantation	
	6. E.R.I. chimie minérale	6. Clarification – Neutralisation (floculation-décantation) + biologique éventuel	
	7. E.R.I. colorants-teintureries	7. id. 6	7. Minéral + organique
	8. E.R.I. tannerie	8. id. 6	8. Minéral + organique + graisse animale et M.O.
	9. Traitement final E.R.I. pour recyclage	9. id. 6	
Minérale hydrophobe	1. Forages	1. Déferrisation et démanganisation biologiques	1. Fe_2O_3 et MnO_2
	2. Rivières et forages	2. Décarbonatation	2. $CaCO_3$ (60 à 90 %) Hydroxydes Fe et Al (5 à 15 %) M.O. < 10 %
	3. Sidérurgie (aciéries, fonderies)	3. Décantation	3. 4.5. Peu d'hydroxydes métalliques. Faible teneur en M.O.
	4. Lavoir à charbon	4. Décantation	
	5. Lavage de gaz de fumées (incinération ordures)	5. Neutralisation Décantation	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 32. Tableau des différentes classes de boues. (suite).

Caractéristique principale de la boue	Origine-Industrie	Traitement de l'eau	Éléments composants
Fibreuse	1. E.R. Papeteries	1. Floculation 1. a) Décantation (ou flottation) seule	1. a) Teneur en fibres variable de 20 à 80 % sur M.S. + hydroxydes (Al). Concentration : 3 à 5 % si taux fibres > 60 % M.S. 10 à 12 % si taux fibres < 30 % M.S.
		1. b) Avec traitement biologique	1. b) $\frac{\text{boues physico-chim.}}{\text{boues biologiques}} = \frac{75\,\%}{25\,\%}$ à $\frac{85\,\%}{15\,\%}$
	2. E.R. Pâte à papier	2. a) Floculation Décantation	Boues primaires avec forte teneur en fibres (et parfois chaux ou $CaCO_3$) - Concentration 4 à 6 % M.S.
		2. b) Avec traitement biologique	2. b) Si boues en excès renvoyées dans le décanteur primaire Concentration des boues épaissies : 3 à 5 % M.S. $\frac{\text{phys.-chim.}}{\text{biol.}} \# \frac{50\,\%}{50\,\%}$
		2. c) Boues de désencrage Flottation	2. c) 40 à 60 % de fibres Nature diverse des charges
	3. E.R. Cartonneries	Si pas de biologique	Recyclage total souvent en usine

Remarque:

Il est à noter que dans le traitement des E.R.U. les boues fraîches concentrent 90% des germes pathogènes et contiennent

- entérobactéries 10^7 à 10^{10} par ml
- salmonelles 10 à 10^7 par ml
- oeufs de parasites 10 à 10^7 par ml ainsi que des amibes et des virus.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.2.
NATURE DES BOUES

6.2.1. Facteurs caractérisant la nature de la boue

A) Concentration en matières sèches (MS): elle s'exprime généralement en grammes par litre ou en pourcentage en poids et est déterminée par séchage à 105°C jusqu'à poids constant. Pour des boues liquides, elle est généralement proche de la teneur en matières en suspension (MES), déterminée par filtration ou centrifugation.

B) Teneur en matières volatiles (MV)

exprimée en pourcentage en poids des M.S., elle se détermine par gazéification dans un four à 550 - 600°C.

Pour les boues de la classe organohydrophile notamment, elle est souvent proche de la teneur en matières organiques (MO) et est caractéristique de la teneur en matières azotées.

C) Composition élémentaire pondérale (surtout pour les boues organiques)

- C et H pour apprécier le degré de stabilisation ou calculer le pouvoir calorifique inférieur,
- N et P pour apprécier la valeur agricole de la boue,
- autres composés (métaux lourds par exemple). Pour les boues minérales, sont souvent utiles les teneurs en Fe, Mg, Al, Cr, en sels de calcium (carbonates et sulfates), et en silice.

D) Composition de l'eau interstitielle - substances dissoutes, - TAC, TA, - DCO, DBO_5, pH, etc.

6.2.2. Facteurs caractérisant la structure de la boue

A) Viscosité apparente en rapport avec le comportement rhéologique

Les suspensions boueuses sont des liquides non newtoniens: la valeur trouvée pour la viscosité est toute relative et dépend de la contrainte de cisaillement appliquée.

Pour certaines boues, et sous certaines précautions, il peut être déduit une viscosité dite de Bingham pour une contrainte caractéristique de T_B (voir figure 29) du même nom.

La viscosité peut être considérée comme une mesure de l'intensité des forces interparticulaires. Elle permet également d'évaluer le caractère thixotropique d'une boue (aptitude de cette boue à se prendre en masse en l'absence de brassage, et à devenir fluide dès qu'elle est légèrement agitée). Cette caractéristique est très utile pour apprécier les possibilités de collecte, de transport et de pompage d'une boue.

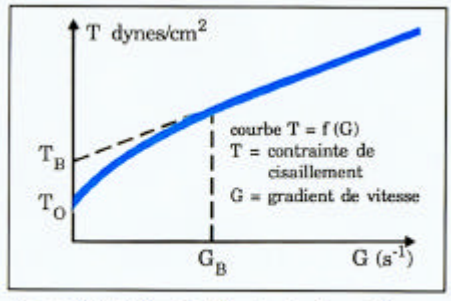


Figure 29. Détermination de la viscosité de BINGHAM.

B) Analyse granulométrique.

C) Nature de l'eau contenue dans la boue.

L'eau contenue dans une boue est la somme :

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- d'une eau libre assez facilement éliminable,
- d'une eau liée comprenant: l'eau capillaire, l'eau d'hydratation colloïdale, l'eau cellulaire et chimiquement liée.

La libération de l'eau liée nécessite une énergie assez forte. L'eau cellulaire n'est séparable que par des moyens thermiques puissants (conditionnement thermique, séchage ou incinération)

La proportion d'eau libre et d'eau liée est donc déterminante dans l'aptitude d'une boue à la déshydratation. Elle peut être approchée par **thermogravimétrie,** c'est-à-lire par l'établissement de la courbe de perte de poids d'eau à température constante d'un échantillon de boue épaissie dans des conditions précises de manipulation (figure 30). Le point d'inflexion du thermogramme peut être déterminé en traçant la courbe V = f(S) où V est la vitesse de séchage et S la siccité de l'échantillon (figure 31). Pour chaque boue, on lit une siccité S correspondant au premier point critique: S est considérée comme étant la siccité de la boue après perte de l'eau libre; pour des raisons d'interprétation pratique, l'eau libre est définie, en thermogravimétrie, comme la quantité d'eau éliminable à vitesse constante de séchage.

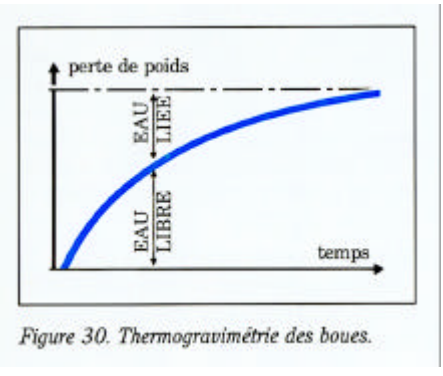


Figure 30. Thermogravimétrie des boues.

La thermogravimétrie permet donc d'estimer la tendance hydrophile d'une boue, mais aussi
- de suivre l'évolution du taux d'eau liée en fonction de divers conditionnements,
- d'évaluer en laboratoire les performances des appareils de déshydratation avec une précis ion suffisante,
- de déterminer, par études comparatives, une siccité limite pour chaque type de traitement,
- éventuellement de calculer l'énergie de liaison des différentes natures d'eau avec la matière boueuse.

L'interprétation des thermogrammes de boues d'hydroxydes est plus complexe à cause de la présence d'une assez grande proportion d'eau chimiquement liée.

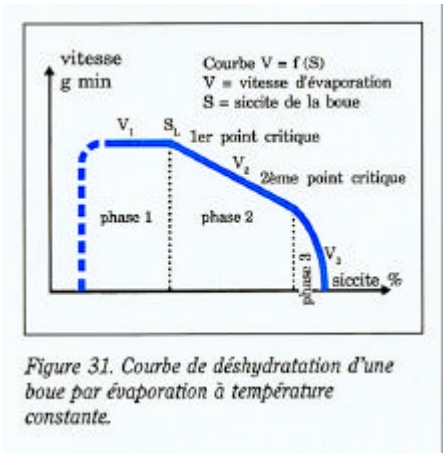


Figure 31. Courbe de déshydratation d'une boue par évaporation à température constante.

6.2.3. Facteurs caractérisant le comportement d'une boue en cours de déshydratation

Ces facteurs sont propres aux techniques d'essorage mises en œuvre :
- aptitude à l'épaississement (voir page 158),

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- caractérisation numérique de la filtrabilité (voir page 177), - caractérisation numérique de la compressibilité d'une boue,
- détermination d'une siccité limite,
- centrifugabilité (voir page 197).

6.3. PRODUCTION DE BOUES

La quantité de boues produites dépend directement de la quantité de MES éliminée et de celle des réactifs de traitement utilisés. Dans le traitement biologique cependant, une partie importante des éléments dissous est assimilée par la population bactérienne et utilisée à la synthèse de matière vivante.

Le traitement des ERU conduit à la production des quantités de boues moyennes indiquées dans le tableau 33 .

Tableau 33. Production de boues en traitement d'ERU.

Traitement(1)	**MES** g/hab.j	**Volume** (2) l/hab.j,
D.P.	40 - 60	0,4 - 0,8
D.P + Dig. an.	25 - 40	0,35 - 0,7
D.P + L.B.	65 - 75	1 - 1,9
D.P + L.B. + Dig. an.	40 - 55	0,9 - 1,8
D.P + B.A.	75 - 90	1,3 - 2,6
D.P.+B.A.+Dig.an.	50-65	1,2-2,5

(1) D.P = décantation primaire B.A. = boues activées
L.B = lits bactériens Dig. An = digestion anaérobie
(2) Après épaississement des boues fraîches

6.4. DESTINATION FINALE DES BOUES ET FINALITÉ DE LEUR TRAITEMENT

La valorisation des boues est souvent aléatoire et leur évacuation constitue presque toujours une charge d'exploitation importante. Sur le plan économique le but à atteindre est en réalité de limiter les frais de leur traitement et de leur transport. Cette optimisation dépend des conditions d'écoulement du produit, des besoins en énergie et du coût de celle-ci, du prix de la main d'oeuvre, des réactifs de conditionnement, etc.

Parallèlement, l'hygiène du travail et la protection de l'environnement imposent le développement de solutions provoquant le minimum de nuisances tout en restant économiquement supportables.

Les principales destinations des boues et sous-produits issus de leur traitement sont les suivantes.

6.4.1. Amendement des sols

On peut utiliser des boues provenant du traitement d'ERU et de certaines ERI. Des essais encourageants ont été également

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

menés avec des boues provenant du traitement physico-chimique d'ERU. Les caractéristiques agronomiques principales des boues provenant de stations d'épuration biologique d'ERU, exprimées en pourcentage sur M.S. sont

Tableau 34.

	Décantation primaire		Décantation primaire + épuration biologique		Aération prolongée
	Fraîches	Digérées	Fraîches	Digérées	
Matières					
Organiques	55 - 65	40 - 55	60 - 80	40 - 65	55 - 70
N	2,5 - 3	2 - 2,5	3,5 - 4,5	2 - 2,5	4 - 5
P	1 - 1,5	0,5 - 1	2 - 2,5	1 - 1,5	2 - 2,5
K	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3
Ca	5 - 15	5 - 15	5 - 15	5 - 15	5 - 15

Mais les boues sont généralement plus intéressantes par les matières humiques qu'elles apportent et par l'amélioration du pouvoir de rétention d'eau du sol que par le seul apport de matières nutritives. La forme sous laquelle se présentent ces matières nutritives est également importante car la vitesse d'assimilation en dépend: l'azote, par exemple n'est assimilable qu'en partie la première année

environ 30 à 50% pour les boues liquides et 20 à 40% pour les boues déshydratées. Les taux d'assimilation annuelle vont ensuite en décroissant. L'intérêt de l'utilisation des boues dépend de la culture des sols, (en particulier pH, teneur en Ca), des cultures, et des types d'exploitation, ainsi que du mode d'épandage.

Du fait des besoins cycliques des cultures, une politique d'utilisation agricole des boues n'est viable que si une solution a été trouvée à la variabilité des besoins en agents nutritifs tout au long de l'année

rotation de cultures, stockage, existence d'une autre voie d'évacuation des boues. Une capacité de stockage importante et suffisante est, dans la quasi totalité des cas la condition première dont dépend la fiabilité d'une solution d'utilisation en cultures. La constance de la qualité du produit a aussi son importance.

Les boues digérées présentent l'avantage d'une forte réduction de germes pathogènes et évitent le dégagement de mauvaises odeurs à l'épandage. Cependant les risques bactériologiques ne doivent pas être surestimés, car la décontamination par voie microbienne dans le sol est importante.

En dehors de la présence excessive dans certains cas de graisses ou fibres le risque potentiel le plus important de l'utilisation des boues en culture est celui lié à la présence de métaux lourds dont l'origine est essentiellement industrielle (en particulier traitement des surfaces métalliques). Les cations dangereux les plus fréquemment rencontrés sont Zn, Cd, Cu, Ni, Cr, Hg.

Les quantités de boues épandables dépendent de la législation en vigueur qui, généralement, prend en compte la durée de l'épandage et les teneurs initiales du sol en éléments riches en métaux lourds. Ces quantités ne doivent pas conduire à un accroisssement notable de l'azote lessivable.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'épandage est à proscrire sur les sols dont le pH conduit à une forte mobilité des éléments trace. Après l'épandage des boues le pH du sol ne doit pas être inférieur à 6. Bien que les apports annuels doivent être déterminés après une enquête agronomique locale, une dose d'application de 3 t.MS/ha.an est une valeur guide raisonnable.

Les boues peuvent être utilisées :

- soit sous une forme liquide,
- soit sous une forme pâteuse (avec structure thixotropique),
- soit à l'état solide plastique (faible adhérence du produit) avec possibilité de pelletage et correspondant à des teneurs en MS de l'ordre de 15 % dans le cas de boues biologiques colloïdales et de < 50% dans le cas de boues minérales très denses,
- soit à l'état solide friable conduisant à un morcellement du résidu sous contrainte mécanique,
- soit à l'état de granulés ou de poudre nécessitant un séchage thermique en plus d'une déshydratation mécanique. Dans ce cas, la valeur agronomique du produit peut être améliorée par apport d'agents nutritifs complémentaires.

Les boues liquides ou pâteuses peuvent être épandues en surface ou enfouies. Ce dernier mode d'utilisation réduit les dégagements d'odeurs qui sont spécialement à craindre sur des boues fermentescibles à forte teneur en eau.

Généralement plus la quantité de boues à évacuer est élevée, plus la déshydratation doit être poussée de façon à réduire les coûts d'évacuation. En effet, il s'agit alors d'agglomérations importantes avec des zones de cultures fort éloignées du centre ville.

6.4.2. Récupération de produits

La récupération n'est envisageable que sur certains éléments contenus dans les boues. En particulier :

- récupération de fibres dans les industries du papier-carton et du bois,
- récupération de protéines (en particulier dans les industries de la viande) à des fins de production d'aliments du bétail, ou pour la pisculture,
- récupération de produits coagulants dans les boues provenant de la clarification d'eaux de rivière (par exemple acidification de boues d'hydroxydes d'Al),
- réutilisation du carbonate de calcium et de la chaux des boues provenant d'un traitement massif à la chaux. Tel est le cas, par exemple des boues de décarbonatation d'eau potable utilisées pour le conditionnement avant déshydratation de boues à prédominance organique provenant du traitement biologique d'ERU.
- récupération de Zn, Cu, Cr, dans les boues provenant d'une épuration d'eaux de traitement de surfaces métalliques,
- réutilisation de boues minérales après séchage thermique ou de cendres d'incinération dans la construction de revêtements routiers, de produits stabilisateurs de sol ou de béton (mais, une telle réutilisation n'a jusqu'à ce jour reçu que des applications limitées).

6.4.3. Récupération d'énergie

La récupération d'énergie n'est pas normalement le but premier du traitement des boues. L'emploi des boues comme combustible exportable en dehors de l'usine d'épuration est rare. Tel peut être le cas pour des boues déshydratées provenant de la décantation de certaines eaux usées très chargées en combustible (poussière de charbon par exemple) pour des suspensions huileuses ou des graisses récupérées par flottation ou même encore pour des boues organiques séchées

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sous forme de granulés ou de poudre. La production de granulés (voire de poudre), à partir de boues très organiques, est également proposée pour la fabrication de combustibles transportables. La récupération d'énergie se réalise essentiellement sous deux formes principales

- production de gaz méthane par fermentation. Le gaz est utilisé pour le chauffage, l'alimentation des groupes électrogènes et le conditionnement thermique des boues elles-mêmes,
- production calorifique dans les fours d'incinération. L'énergie ainsi produite sert essentiellement, sinon totalement, à sécher préalablement les boues. Lorsque la siccité initiale des boues le permet, l'énergie thermique excédentaire peut être transformée en énergie électrique.

Toute récupération d'énergie s'accompagne de la réduction partielle ou totale des germe pathogènes dans les boues.

6.4.4. Décharge

C'est encore sans doute la destination finale la plus fréquente des boues produites. Le résidu peut être plus ou moins important, mais même dans le cas d'incinération il demeure un sous-produit de volume non négligeable et rassemblant normalement tous les métaux lourds contenus dans les boues.

Cette décharge peut aller de la simple "lagune à boues liquides" alimentée en boues stabilisées et dont le drainage et l'évaporation nécessitent des mois ou des années, jusqu'au remblaiement d'excavations ou de dépressions à l'aide de boues sèches dont le compactage est plus rapide.

Une solution parfois envisagée, en particulier sur les boues toxiques, est, avant décharge, d'incorporer aux boues liquides des produits solidifiants (silicates, ciments, etc.). Ce mode de traitement présente l'inconvénient de condamner définitivement des surfaces au sol importantes. De plus, les risques de lixiviation par les eaux de ruissellement ne semblent pas totalement écartés.

Enfin, la mise en décharge commune des boues avec les ordures ménagères est une pratique encore fréquente. Les législations en la matière varient suivant les pays. Il convient de ne pas dépasser une teneur maximale en eau du produit, de veiller à son homogénéité et de prendre les dispositions nécessaires à la protection de la nappe, avec collecte et traitement du lixiviat (voir page 592).

6.4.5. Rejet en mer

Cette solution expéditive consiste le plus souvent en un déversement discontinu au large au moyen de barges et chalands. Dans quelques cas cette évacuation est réalisée par un émissaire sous-marin suffisamment long et immergé en profondeur.

Le choix d'un rejet en mer nécessite au préalable un examen minutieux et prolongé des courants ainsi que des études bactériologiques, biologiques et piscicoles de qualité. La destruction des germes pathogènes et la dégradation des matières organiques en milieu marin sont lentes.

Les boues déversées en mer doivent être débarassées des matières flottantes. La digestion anaérobie est le prétraitement préalable le plus souvent adopté.

6.4.6. Réinjection dans le sol

Cette solution envisagée essentiellement sur des boues toxiques ou des eaux très concentrées consiste à injecter les boues à l'état liquide à grande profondeur dans les poches poreuses du sous-sol isolées entre des couches continues perméables. Une étude géologique très sérieuse est évidemment indispensable.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3
PROCESSUS ÉLÉMENTAIRES DU GÉNIE PHYSICO-CHIMIQUE DU TRAITEMENT DE L'EAU

1. COAGULATION - FLOCULATION

1.1 GÉNÉRALITÉS

1.1.1. Matières en suspension et colloïdes

1.1.1.1. Définitions

L'eau contient de nombreux composés qui peuvent se regrouper en trois catégories (voir page 5).

- **Matières en suspension**

Ces produits peuvent être d'origine minérale (sables, limons, argiles, ...) ou organique (produits de la décomposition des matières végétales ou animales, acides humiques ou fulviques par exemple). A ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que bactéries, plancton, algues et virus. Ces substances sont responsables, en particulier, de la turbidité et de la couleur.

- **Matières colloïdales** (moins de 1 micron) Ce sont des MES de même origine que les précédentes mais de plus petite taille, dont la décantation est excessivement lente. Elles sont également génératrices de turbidité et de couleur.
- **Matières dissoutes** (moins de quelques nanomètres)

Ce sont généralement des cations ou des anions. Une partie de la matière organique est également sous forme dissoute. On trouve aussi des gaz (O_2, CO_2, H_2S, ...)

1.1.1.2. Rôle de la coagulation - floculation

Les procédés de coagulation et de floculation facilitent l'élimination des MES et colloïdales. Celle-ci est réalisée dans une étape ultérieure de séparation solide liquide: décantation, flottation ou filtration (sous chapitres 3, 4, 5).

L'élimination des substances dissoutes nécessite pour chaque espèce un traitement spécifique, précédé ou non d'une coagulation -floculation, voire d'une séparation solide -liquide.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.1.2. Les suspensions colloidales

1.1.2.1. Stabilité des suspensions colloïdales - Nécessité de la coagulation.

Dans le tableau 35 sont répertoriés certains matériaux ou organismes avec leur dimension et l'ordre de grandeur du temps nécessaire pour que, sous la seule influence de leur poids, les particules parcourent verticalement, à 20 °C, un mètre d'eau.

Tableau 35. Temps de décantation de différentes particules.
(D'après la loi de STOKES)

Diamètre de particule			**Type de pécule**	**Temps de décantation pour 1 m d'eau**	**Surface Spécifique $m^2 . m^{-3}$**
mm	Pm	Å			
10	10^4	10^8	Gravier	1 seconde	6.10^1
1	10^3	10^7	Sable	10 secondes	6.10^3
10^{-1}	10^2	10^6	Sable fin	2 minutes	6.10^4
10^{-2}	10^1	10^5	Argile	2 heures	6.10^5
10^{-3}	1	10^4	Bactérie	8 jours	6.10^6
10^{-4}	10^{-1}	10^3	Colloïde	2 ans	6.10^7
10^{-5}	10^{-2}	10^2	Colloïde	20 ans	6.10^8
10^{-6}	10^{-3}	10	Colloïde	200 ans	6.10^9

Ce tableau indique également que plus la particule est petite, plus sa surface spécifique est grande.

Les colloïdes sont donc des **particules impossibles à décanter naturellement**, et pour lesquelles les phénomènes de surface sont primordiaux. Ces phénomènes régissent la **stabilité des suspensions colloïdales**. En effet, les colloïdes sont soumis à deux grands types de forces

- **force d'attraction de Van der Vaals**, liée à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu (EA),
- **force de répulsion électrostatique**, liée aux charges superficielles des colloïdes (EB).

La stabilité d'une suspension colloïdale dépend du bilan des forces d'attraction et de répulsion, dont le niveau énergétique est donné par :

E=EA+EB

Cette relation est schématisée sur la figure 32

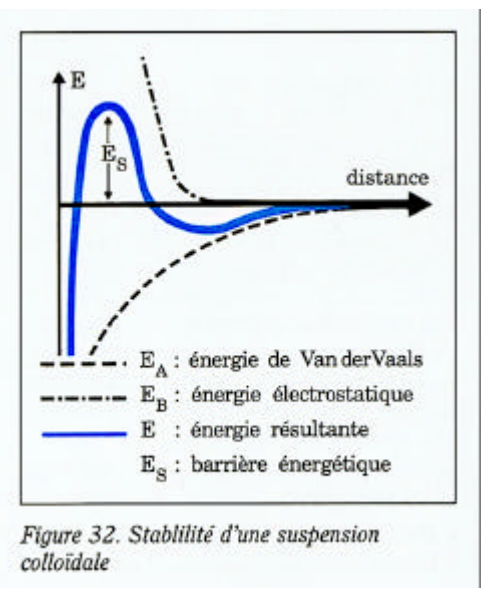


Figure 32. Stablilité d'une suspension colloïdale

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Pour déstabiliser la suspension, il faut franchir la barrière énergétique E_s. Pour cela, et afin de favoriser l'agglomération des colloïdes, il faut diminuer les forces de répulsion électrostatique. C'est la coagulation qui réalise cette déstabilisation.

1.1.2.2. Théorie de la double couche

Les colloïdes présents dans l'eau brute sont très généralement chargés négativement (imperfections du réseau cristallin, ionisation des groupements chimiques périphériques, ...). Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs, présents dans l'eau brute ou ajoutés, viennent former une couche autour du colloïde. Diverses théories ont été avancées (figure 33)

- **Théorie de HELMHOLTZ:** Une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche adhérée).
- **Théorie de GOUM-CHAPMAN**. La couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde; la neutralité est obtenue à plus grande distance (couche diffuse).
- **Théorie de STERN** qui rassemble les deux précédentes et considère la formation d'une double couche. La première couche est adhérente au colloïde, le potentiel y décroît rapidement. La seconde couche est plus diffuse, avec une diminution plus lente du potentiel.

1.1.2.3. Le potentiel Zéta

Le colloïde se déplace avec une partie de sa double couche. Cette couche, liée au colloïde, correspond à la couche fixe de la théorie de Stem. Le colloïde se caractérise par deux potentiels (figure 33)

- E : Potentiel à la surface du colloïde ou potentiel thermodynamique (Nernst, §8.1.1).
- Z : Potentiel à la surface du plan de cisaillement ou potentiel électrocinétique.

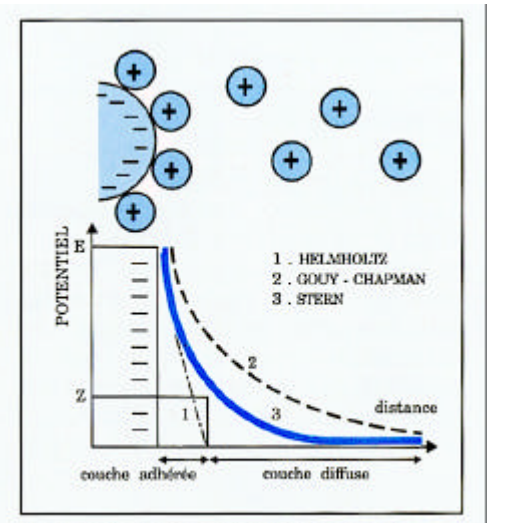


Figure 33. Théorie de la double couche.

.

Ce potentiel Z, encore appelé potentiel Zéta, régit le déplacement des colloïdes et leur interaction mutuelle. L'électrophorèse permet de le définir: quand une particule est soumise à un champ électrique, elle atteint presque instantanément une vitesse telle qu'un équilibre s'établit entre la force électrique d'attraction et la force de frottement due à la viscosité du milieu. Le calcul conduit à la relation suivante entre la mobilité électrophorétique et le potentiel Zéta

$$me = \frac{\varepsilon z}{k\eta}$$

Me : Mobilité électrophorétique
e : Constante diélectrique du milieu
? : Viscosité dynamique
k : 4 ou 6 suivant les hypothèses.

Des particules ayant le même potentiel électrocinétique Zéta possèdent la même mobilité électrophorétique indépendamment de leur diamètre.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans la théorie de la double couche, la coagulation est l'annulation du potentiel Zéta.

L'appareil permettant la mesure du potentiel électrocinétique est le Zétamètre (voir page 451).

1.1.2.4. La théorie chimique

Les énergies de liaisons covalentes étant de 20 à 50 fois supérieures aux énergies électrostatiques, une "**théorie chimique**" a été également introduite pour interpréter la déstabilisation des suspensions colloïdales. Ce modèle considère que la charge primaire d'une particule colloïdale est due à l'ionisation directe des groupements chimiques présents à sa surface (hydroxyles, carboxyles, phosphates, sulfates, ...). La déstabilisation se réalise par **réaction covalente** entre ces groupes et les ions métalliques polyvalents des coagulants.

Cette théorie montre que la précipitation simultanée d'hydroxydes métalliques et le pontage interparticulaire sont des phénomènes importants dans la coagulation.

1.1.3. Les étapes de l'agrégation

1.1.3.1. Présentation

Diverses phases successives ou simultanées interviennent dans l'agrégation des particules (tableau 36).

Tableau 36. Les étapes de l'agrégation

Stade	Phénomènes	Terminologie
AJOUT DU COAGULANT	Réaction avec l'eau ionisation, hydrolyse, polymérisation	HYDROLYSE
DÉSTABILISATION	Compression de la double couche	COAGULATION
	Absorption spécifique d'ions du coagulant à la surface de la particule	
	Liaison spécifique d'ions ou d'espèces à la surface de la particule	
	Inclusion du colloïde dans un précipité d'hydroxyde	
	Liaison interparticulaire par des espèces polymériques du coagulant	
TRANSPORT	Mouvement brownien	FLOCULATION PÉRICINÉTIQUE
	Énergie dissipée (gradient de vitesse)	FLOCULATION ORTHOCINÉTIQUE

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La **coagulation** est la déstabilisation des particules colloïdales par addition d'un réactif chimique, **le coagulant**

La **floculation** est l'agglomération de ces particules **"déchargées"** en microfloc, puis en flocons volumineux et décantables, **le floc**. Cette floculation peut être améliorée par l'ajout d'un autre réactif: le **floculant** ou **adjuvant de floculation**.

Deux phénomènes de transport régissent la floculation

. La floculation péricinétique liée à la diffusion brownienne (agitation thermique). La vitesse de floculation ou variation du nombre de particules au cours du temps est donnée par

$$\frac{dn}{dt} = \alpha \frac{4kT}{3\eta} n^2$$

n : Nombre de particules par unité de volume
a : Fraction des chocs efficaces
k : Constante de Boltzmann
T : Température absolue
? : Viscosité dynamique
d : Diamètre de la particule.

Cette floculation n'intervient que pour de petites particules dont la taille est inférieure à 1 micron. Elle favorise la formation du microfloc.

- **La floculation orthocinétique** est liée à l'énergie dissipée. L'efficacité de cette floculation qui permet d'obtenir le floc volumineux séparable est donnée par

	Régime laminaire	**Régime turbulent**
$-\frac{dn}{dt}$	$\frac{1}{6} \alpha n^2 G^o d^3$	$KG^0 n^2 d^3$

Le gradient de vitesse G° n'est définissable qu'en régime laminaire, comme la différence de vitesse entre deux veines liquides adjacentes dans le plan orthogonal à leur déplacement :

$$G^\circ = \frac{dV}{dz}$$

Dans la pratique, on utilise un gradient de vitesse G correspondant au régime turbulent

1.1.3.2. Importance du ?radient de vitesse

Le gradient de vitesse est défini par

$$G = \sqrt{\frac{P}{V.\eta}} = K \sqrt{\frac{P}{V}}$$

G : Gradient de vitesse moyen s 1
P: Puissance réellement dissipée
m^2 : 2.kg/s3 (W)
? : Viscosité dynamique kg/m.s
V : Volume occupé par le fluide m^3

Cette définition de G est applicable par extension à tout type de régime hydraulique. G dépend en particulier de la température

Température °C	**K**
0	23,6
5	25,6
10	2 7,6
15	29,6
20	31,5
30	35,4
40	38,9

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le gradient de vitesse est l'un des paramètres importants agissant sur la probabilité de rencontre des particules. Il n'est pas possible de l'augmenter exagérément. En effet, pour des valeurs trop élevées de G, le floc formé subit un cisaillement mécanique entraînant sa destruction. Les valeurs généralement admises pour G sont
- en coagulation: jusqu'à 400, voire 1000 s^{-1}
- en floculation: de l'ordre de 100 s^{-1}.

1.1.3.3. Temps de coagulation et de floculation

Les temps nécessaires pour les réactions de coagulation et de floculation sont des paramètres essentiels. La cinétique est influencée par la nature du milieu, la température, la concentration en colloïdes, la présence d'inhibiteurs, etc.

La mise en oeuvre de ces réactions peut être caractérisée par le paramètre adimensionnel G.? (? temps de contact). La valeur de ? peut être déterminée par un essai de floculation (voir page 352).

1.1.4. Les coagulants

- **Cations trivalents**

La neutralisation de la charge superficielle négative du colloïde est réalisée par l'ajout de cations dans le cas de coagulants minéraux. La coagulation est d'autant plus efficace que la valence du cation est élevée (théorie de Schulze Hardy: un ion trivalent est dix fois plus efficace qu'un ion divalent). Le choix du coagulant doit tenir compte de l'innocuité du produit choisi et de son coût. Ainsi, les sels de fer ou d'aluminium trivalents ont été, et continuent d'être, largement utilisés dans tous les traitements de coagulation d'eau.

Influence du pH

Les coagulants minéraux, par suite de leur hydrolyse, modifient les caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter (pH, conductivité)

$$M^{3+} + 3H_2O \rightleftarrows \underline{M(OH)_3}\downarrow + 3H^+$$

Par ailleurs, le pH est un paramètre primordial pour l'élimination des colloïdes. Le pH optimal constitue un compromis entre le pH nécessaire pour la coagulation (lié à la nature des colloïdes) et le pH nécessaire à la floculation (lié à la croissance du floc d'hydroxyde de fer ou d'aluminium). Il correspond en général au minimum de solubilité de l'hydroxyde considéré (optimisation de la phase floculation). Ce pH et la solubilité minimale sont fortement influencés par la force ionique et la présence de composés organiques tels que les acides humiques.

Cation	**pH optimal de** coagulation - floculation
$A1^{3+}$	6,0 - 7,4
Fe^{3+}	supérieur à 5

Le pH de coagulation peut être ajusté par ajout d'acide ou de base.

- **Taux de traitement**

Le taux de traitement à mettre en ceuvre est donné par un essai de floculation. Il peut être ajusté par l'étude du potentiel Zéta (voir page 351).

- **Production de boue**

La formation d'hydroxyde métallique entraîne la production d'un volume de boue important. Ces boues sont à éliminer dans le processus de séparation liquide - solide ultérieur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Des **coagulants organiques** peuvent également être employés. Ce sont des polyélectrolytes cationiques qui neutralisent directement les colloïdes négatifs. Le volume de boue produit est alors considérablement réduit

1.1.5. Les floculants

Des **polymères minéraux** (silice activée) et des **polymères naturels** (amidon, alginate) ont d'abord été utilisés. Mais, l'apparition **de polymères de synthèse** très diversifiés a fait évoluer considérablement les performances de la floculation.

Le taux de traitement à mettre en oeuvre est donné, comme pour le coagulant, par un essai de floculation. Le temps à respecter entre les ajouts du coagulant et du floculant est primordial. En effet, un floculant n'est en général efficace que lorsque la phase de coagulation est achevée. La durée de cette dernière dépend de la nature des colloïdes, mais aussi de la température de l'eau brute. Les paramètres principaux à considérer sont la taille, la cohésion du floc et sa vitesse de décantation.

L'emploi de floculants de synthèse conduit souvent à un volume de boue très inférieur. Combiné à des méthodes modernes de séparation, il peut permettre de produire des boues très épaisses, traitables directement par une unité de déshydratation

1.2. LES RÉACTIFS

Les réactifs de coagulation et de floculation sont des produits d'origine minérale, des polymères naturels ou des polymères de synthèse.

1.2.1. Les coagulants minéraux

Les coagulants principalement utilisés sont à base de sels d'aluminium ou de fer. On peut également, dans certains cas, utiliser des produits de synthèse, tels que les polyélectrolytes cationiques décrits ultérieurement.

1.2.1.1. Sels d'aluminium

La réaction de base, lors de l'ajout de l'ion Al^{3+} dans l'eau est la formation d'un précipité d'hydroxyde d'aluminium avec libération d'une certaine acidité

$$Al^{3+} + 3H_2O \rightleftarrows \underline{Al(OH)_3\downarrow} + 3H^+$$

.

Cette acidité peut réagir sur certaines espèces en solution, notamment sur les ions bicarbonates

$$HCO_3^- + H^+ \rightleftarrows H_2O + CO_2$$

Cette acidité peut être compensée lors de l'ajout du coagulant par l'adjonction d'une base (soude, chaux, carbonate de sodium).

$$Al^{3+} + 3\ OH^- \rightleftarrows \underline{Al(OH)_3\downarrow}$$

Les réactions données dans ce chapitre sont des écritures schématisées résumant ces diverses réactions. Tous les produits formés sont solubles à l'exception d'$Al(OH)_3$ et de $CaCO_3$. Les réactifs ajoutés sont donnés sous forme molaire.

- **Sulfate d'aluminium** (forme liquide ou solide)

$$Al_2(SO_4)_3 + 6\ HCO_3^- \rightleftarrows \underline{2\ Al(OH)_3\downarrow} + 3\ SO_4^{2-} + 6\ CO_2$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dose: En clarification d'eaux de surface, suivant la qualité des eaux, 10 à 150 g.m-3 3 exprimés en produit commercial solide ($Al_2(S0_4)_3$,18 H_2O). En traitement d'eaux résiduaires, de 50 à 300 $g.m^{-3}$

- **Chlorure d'aluminium (liquide)**

$$2\ AlCl_3 + 6\ HCO3^- \rightleftarrows \underline{2\ Al(OH)_3\downarrow} + 6\ Cl^- + 6\ CO_2$$

C'est un produit efficace mais dont l'emploi est réservé à des cas particuliers.

- **Sulfate d'aluminium** + chaux

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\ Ca(OH)_2 \rightleftarrows \underline{2\ Al(OH)_3\downarrow} + 3\ Ca^{2+} + 3\ SO_4^{2-}$$

Dose: pour compenser l'acidification, il faut en chaux $Ca(OH)_2$ environ le tiers de la dose de sulfate d'aluminium exprimée en produit commercial solide.

- **Sulfate d'aluminium + carbonate de sodium**

Deux types de réactions peuvent se produire selon la neutralisation des ions carbonates, en bicarbonates ou en CO_2 libre.

$$Al_2(SO_4)_3 + 6\ Na_2CO_3 + 6\ H_2O \rightleftarrows \underline{2\ Al(OH)_3\downarrow} + 12\ Na^+ + 6\ HCO_3^- + 3\ SO_4^{2-}$$

$$2\ Al_2(SO_4)_3 + 6\ Na_2CO_3 + 6\ H_2O \rightleftarrows \underline{4\ Al(OH)_3\downarrow} + 12\ Na^+ + 6\ SO_4^{2-} + 6\ CO_2$$

Dose: il faut, en carbonate de sodium, entre 50 et 100 % de la dose de sulfate d'aluminium commercial solide.

- **Aluminate de sodium**

Contrairement au cas précédent, l'aluminium est ici sous forme basique

$$AlO_2^- + 2\ H_2O \rightleftarrows \underline{Al(OH)_3\downarrow} + OH^-$$

Il peut déplacer les ions bicarbonates et le CO2 dissous.

$$NaAlO_2 + Ca(HCO_3)_2 + H_2O \rightleftarrows \underline{Al(OH)_3\downarrow} + \underline{CaCO_3\downarrow} + Na^+ + HCO_3^-$$

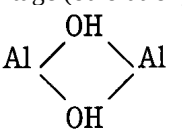
$$2\ NaAlO_2 + 2\ CO_2 + 4\ H_2O \rightleftarrows \underline{Al(OH)_3\downarrow} + 2\ Na^+ + 2\ HCO_3^-$$

Dose: en clarification d'eau de surface, 5 à 50 $g.m^{-3}$ de réactif commercial à 50% d'Al_2O_3.

1.2.1.2. Polymères d'aluminium

L'utilisation de polymères d'aluminium permet à la fois la neutralisation et le pontage des colloïdes qui conduisent à une coagulation plus efficace.

De plus, l'utilisation de polymères permet de se rapprocher des espèces cristallisées d'hydroxydes d'aluminium comme la Bayerite ou la Gibbsite. La polymérisation de l'hydroxyde d'aluminium en solution est une ébauche de la structure de base de ces cristaux. L'unité de base serait $Al_6(OH)_{12}^{6+}$. Cette polymérisation est initiée par une réaction de pontage (ou olation)



Il existe une série continue de polymères dont la taille augmente avec le degré d'hydroxylation, (rapport molaire R = OH/Al). Plus la polymérisation est avancée plus le floc se rapproche de la structure cristalline, et plus il est compact et dense. Mais à partir d'un certain rapport R, ces produits commerciaux sont très instables

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Produits commerciaux**

La formule générale de ces produits est:

$Al_n(OH)_P(C1)_q(S0_4)_r$

Ils se caractérisent par un rapport molaire OH/A1 compris entre 0,4 et 0,6.
Ils sont moins acides que les sels d'aluminium classiques. Leur stabilité est souvent assurée par la présence d'ions sulfates qui inhibent la polymérisation spontanée du produit. Leur utilisation conduit souvent à un taux de traitement inférieur à celui du sulfate d'aluminium (exprimé en $A1^{3+}$). La cohésion des boues est généralement meilleure, mais un adjuvant de floculation demeure souvent nécessaire.

Les produits commerciaux disponibles sont en évolution continue. On peut citer: PAC, WAC, Aqualenc, Alpoclar…

- **PCBA** (Polychlorure basique d'aluminium)

Pour obtenir un polymère d'aluminium plus performant, il est nécessaire de le préparer sur place juste avant son utilisation (brevet Degrémont). Un rapport OH/A1 beaucoup plus élevé est obtenu par neutralisation contrôlée du chlorure d'aluminium à l'aide d'une base. Ce rapport, voisin de 2,5, peut être adapté suivant la nature de l'eau brute.

Les avantages du PCBA, comparés à un sel d'aluminium classique, sont :
- floculation rapide,
- bonne élimination des matières organiques,
- taux de traitement plus faible (exprimés en Al^{3+}),
- volume de boue diminué,
- adjuvant de floculation souvent inutile.

Sa préparation in situ le réserve à de grandes installations.

1.2.1.3. Sels de fer

Le principe de la réaction est le même que pour les sels d'aluminium avec

$$Fe^{3+} + 3\,H_2O \rightleftarrows \underline{Fe(OH)_3\downarrow} + 3\,H^+$$

L'ion ferrique peut induire une coloration de l'eau traitée.

- **Chlorure ferrique** (liquide, parfois cristallisé)

$$2\,FeC1_3 + 6\,HCO_3^- \rightleftarrows \underline{2\,Fe(OH)_3\downarrow} + 6\,C1^- + 6\,CO_2$$

Dose

En clarification d'eau de surface, 5 à 150 $g.m^{-3}$ de chlorure ferrique commercial solide $FeCl_3$, $6\,H_2O$

En traitement d'eaux résiduaires, 50 à 300 $g.m^{-3}$ de chlorure ferrique commercial solide.

- **Chlorure ferrique + chaux**

$$2\,FeC1_3 + 3\,Ca(OH)_2 \rightleftarrows \underline{2\,Fe(OH)_3\downarrow} + 6\,C1^- + 3\,Ca^{2+}$$

Dose: en traitement d'eaux résiduaires il faut 50 à 500 $g.m^{-3}$ de chaux pour 50 à 300 $g.m^{-3}$ de chlorure ferrique commercial solide.

- **Sulfate ferrique** (solide)

$$Fe_2(SO_4)_3 + 6\,HCO_3^- \rightleftarrows \underline{2\,Fe(OH)_3\downarrow} + 3\,SO_4^{2-} + 6\,CO_2$$

Dose: en clarification d'eau de surface, il faut 10 à 250 $g.m^{-3}$ de réactif commercial $Fe_2(SO_4)_3$, $9\,H_2O$

- **Sulfate Sulfate ferrique + chaux**

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3\,Ca(OH)_2 \rightleftarrows \underline{2\,Fe(OH)_3\downarrow} + 3\,SO_4^{2-} + 3\,Ca^{2+}$$

Dose: en clarification d'eau de surface, il faut en chaux $Ca(OH)_2$ environ 50 % de la dose de sulfate ferrique commercial $Fe_2(SO_4)_3$, $9\,H_2O$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Chlorosulfate ferrique** (liquide)

$$2\ FeClSO_4 + 6\ HCO_3^- \rightleftarrows 2\ Fe(OH)_3\downarrow + 2\ Cl^- + 2\ SO_4^{2-} + 6CO_2$$

Dose: analogue à celle du chlorure ferrique exprimée en fer.

- **Sulfate ferreux** (solide)

$$FeSO_4 + 2\ HCO_3^- \rightleftarrows Fe(OH)_2\downarrow + SO_4^{2-} + 2CO_2$$

Dose: en clarification d'eau de surface, il faut de 5 à 15 0 $g.m^{-3}$ de réactif commercial $FeSO_4, 7\ H_20$

En traitement d'eaux résiduaires, il faut 100 à 400 $g.m^{-3}$ de réactif commercial $FeSO_4, 7\ H_20$

Dans Dans les eaux aérées, l'hydroxyde ferreux s'oxyde en hydroxyde ferrique:

$$2\ Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightleftarrows 2\ Fe(OH)_3$$

- **Sulfate ferreux + chlore**

$$2\ FeSO_4 + Cl_2 + 6\ HCO_3^- \rightleftarrows 2\ Fe(OH)_3\downarrow + 2\ SO_4^{2-} + 2\ Cl^- + 6\ CO_2$$

Dose: il faut, en chlore, 12 % de la dose de sulfate ferreux $FeSO_4, 7\ H_2O$.

Le sulfate ferreux et le chlore peuvent être introduits séparément. L'oxydation préalable du sulfate ferreux par le chlore conduit au chlorosulfate ferrique (clairtan, etc.).

- **Sulfate ferreux + chaux**

$$FeSO_4 + Ca(OH)_2 \rightleftarrows Fe(OH)_2\downarrow + Ca^{2+} + SO_4^{2-}$$

Dose : en clarification d'eau de surface, il faut en chaux $Ca(OH)_2$, environ

30% de la dose de sulfate ferreux $FeS0_4, 7\ H_20$.

En traitement d'eaux résiduaires, il faut 100 à 150 $g.m^{-3}$ de chaux pour 250 à 350 $g.m^{-3}$ de sulfate ferreux.

1.2.1.4. Autres coagulants minéraux

- **produits mixtes Al^{3+}/Fe^{3+}**

Certains coagulants minéraux apportent à la fois des ions $A1^{3+}$ et Fe^{3+} C'est le cas, en particulier, de l'AVR, sulfate mixte d'aluminium et de fer (solide). Ce produit est utilisé essentiellement en épuration chimique des ERU et des ERI, en particulier pour l'élimination des phosphates.

- **Sulfate de cuivre**

$$CuSO_4 + 2\ HCO_3^- \rightleftarrows Cu(OH)_2\downarrow + SO_4^{2-} + 2\ CO_2$$

Dose: 5 à 20 $g.m^{-3}$ de produit commercial $CUSO_4, 5H_2O$ (usage exceptionnel).

Ce produit est principalement utilisé comme algicide.

- **Ozone**

L'ozonation d'une eau riche en matières organiques complexant du fer et du manganèse peut déclencher un mécanisme de coagulation -floculation. L'ozone détruit les complexes organiques puis oxyde les ions métalliques ainsi libérés. Si les conditions de pH requises sont atteintes, la floculation de l'hydroxyde ferrique conduit à un floc de densité et de cohésion assez faible qui peut être retenu par coagulation sur filtre.

- **Chlore**

Sur eau de mer le chlore libre est nécessaire pour initier les réactions de coagulation.

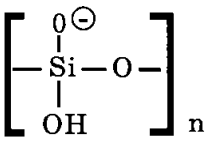
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.2. Adjuvants de floculation "naturels"

1.2.2.1. Floculants minéraux

- **Silice activée**

La silice activée a été le premier floculant employé. Elle donne de bons résultats principalement quand elle est associée au sulfate d'aluminium en eau froide. Préparée juste avant utilisation par neutralisation partielle de l'alcalinité d'une solution de silicate de sodium, elle est introduite après le coagulant



Le taux de traitement à mettre en oeuvre est de 0,5 à 4 $mg.l^{-1}$ exprimé en SiO_2

- **Silico-aluminate**

Lorsque le coagulant est du sulfate d'aluminium (ou un autre sel d'aluminium), l'acidité de ce produit peut être utilisée à la place de celle de l'acide sulfurique pour réaliser l'activation du silicate de sodium. Des produits analogues à la silice activée sont obtenus tel le silico-aluminate. Dans certains cas particuliers, le silicate de sodium peut être utilisé seul.

- **Autres adjuvants minéraux**

En amont d'une décantation ou d'une filtration, certains produits sont utilisés pour charger une eau brute qui ne contient pas assez de MES. Ce ne sont pas des floculants mais ils participent à la croissance du floc et à sa densification.

Ce sont par exemple

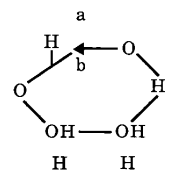
- certaines argiles (bentonite, kaolin),
- blanc de Meudon ou carbonate de calcium précipité,
- Kieselguhr (diatomées),
- charbon actif en poudre (utilisé principalement comme adsorbant),
- sable fin.

1.2.2.2. Floculants organiques (polymères naturels)

Ce sont des polymères naturels extraits de substances animales ou végétales.

- **Alginates**

Les alginates de sodium sont obtenus à partir de l'acide alginique, lui-même extrait d'algues marines. Les constituants essentiels de cette structure polymérique sont l'acide mannuronique et l'acide guluronique. La masse molaire est de l'ordre de 10^4 à 2.10^5.



	a	b
Mannuronique	COOH	H
Guluronique	H	COOH

Ce sont des produits particulièrement efficaces comme adjuvants de floculation avec les sels ferriques. Ils peuvent donner également de bons résultats avec les sels d'aluminium. Les taux de traitement sont de 0,5 à 2 $mg.l^{-1}$.

- **Amidons**

Les amidons sont obtenus à partir de pommes de terre, de tapioca ou d'extraits de graines végétales. Ce sont des polymères de glucopyranose ramifiés et non linéaires parfois partiellement dégradés (OH^-) ou dérivés (carboxy-éthyl-dextrone). Ils sont appliqués entre 1 et 10 mg l^{1}, de préférence avec des sels d'aluminium.

Amidons et alginates sont des produits solides qui doivent être préparés à une concentration de 5 à 10 $g.l^{-1.}$ Leur dégradation en milieu aqueux peut être rapide

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

quand la température extérieure est élevée (plus de 20 °C). Les cuves de préparation doivent être régulièrement nettoyées(risques de fermentation).

- **Autres composés**

Il existe beaucoup d'autres floculants organiques naturels, mais ils sont surtout employés dans des procédés industriels spécifiques (hydrométallurgie, papeterie, ...). Ce sont essentiellement des polysaccharides:
- galactomannanes (gommes: Guar, Caroube),
- pectines,
- xanthanes (fermentation aérobie de sucres par une bactérie de genre Xanthomonas ; exemple: le Rhodopol).

D'autres produits sont également rencontrés tels que les dérivés de la cellulose (carboxyméthyl-cellulose), les gélatines et les tannins.

1.2.3. Les coagulants organiques de synthèse

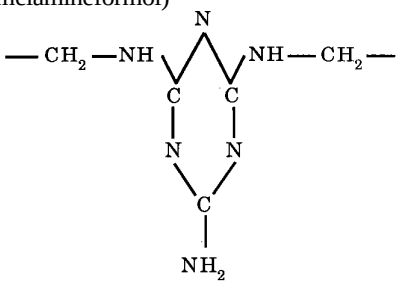
Ce sont des molécules organiques de synthèse, à caractère cationique, de masse molaire moyenne (104 à 105). Ils sont disponibles uniquement sous forme liquide, en milieu aqueux.

Ces produits sont utilisables directement (pas de poste de préparation), en remplacement total ou partiel d'un coagulant minéral. Ils doivent être injectés après dilution en ligne.

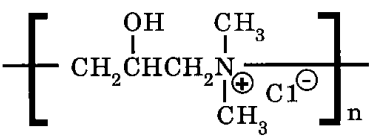
L'utilisation de coagulants organiques conduit à une réduction importante du volume de boue produit. Les boues extraites sont plus denses, mais aussi plus collantes. Leur application n'est donc pas adaptable à n'importe quel type d'ouvrage de séparation. Un coagulant organique ne modifie que très faiblement le pH et apporte très peu de salinité supplémentaire.

1.2.3.1. Classification

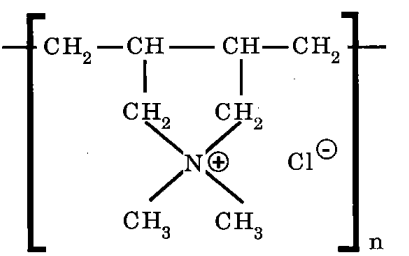
Trois famille principales sont rencontrées
- mélamineformaldéhyde (ou mélamineformol)



- épichlorhydrine diméthylamine (EPI.DMA)



- poly (chlorure de diallyldiméthyl-ammonium) (POLYDADMAC)



D'autres produits sont encore rencontrés tels que des polyamines différentes de l'EPI.DMA et les polyéthylénimines, principalement en clarification d'eaux résiduaires industrielles.

1.2.3.2. Domaines d'application

- **Clarification**

Pour le traitement d'une eau destinée à l'alimentation, il faut se référer à la législation du pays concerné. Les taux de traitement à appliquer sont de l'ordre de 5 à 15 $g.m^{-3}$ exprimés en produit commercial.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Coagulation sur filtre**.

En filtration d'eau de mer, pour certains produits, la réaction de coagulation peut être associée à une réaction prématurée et préjudiciable de précipitation du coagulant en raison de la forte salinité.

- **Eaux résiduaires industrielles**

C'est un domaine d'application important des coagulants organiques. Le taux de traitement (5 à 50 $g.m^{-3}$) dépend considérablement du type d'effluent.

1.2.3.3. Synergie avec un coagulant minéral

Dans certains cas, le coagulant organique seul ne permet pas d'atteindre la qualité d'eau obtenue avec un coagulant minéral.

L'utilisation conjointe des deux types de coagulant permet une très nette diminution de la quantité de coagulant minéral nécessaire (40 à 80 %), tout en assurant un moindre volume de boue produit.

1.2.4. Floculants organiques de synthèse

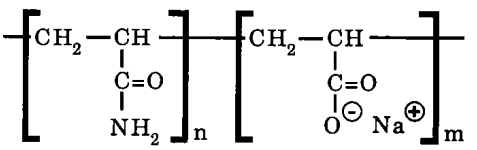
Ce sont des macromolécules à longue chaîne obtenues par association de monomères synthétiques, dont certains possèdent des charges électriques ou des groupements ionisables. Ce sont des produits à très haute masse molaire (10^6 à 10^7) qui ont permis d'atteindre des performances remarquables généralement très supérieures à celles des polymères naturels.

1.2.4.1 Classification

Elle s'effectue suivant l'ionicité du polymère.

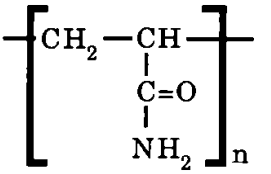
- **Anioniques**

Ce sont généralement des copolymères de l'acrylamide et de l'acide acrylique.



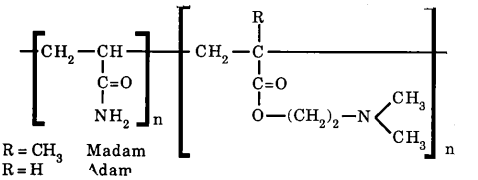
- **Neutres** (ou non-ioniques)

Ce sont essentiellement des polyacrylamides.



- **Cationiques**

Ce sont des copolymères d'acrylamide et d'un monomère cationique, généralement le MADAM (Méthacrylate de diméthylamino-éthyle) ou l'ADAM (Acrylate de diméthylamino-éthyle).



1.2.4.2. Mise en oeuvre

Les floculants organiques sont disponibles sous trois formes

- solide,
- émulsion (polymère en émulsion dans un solvant organique),
- solution (à environ 20 $g.l^{-1}$ en milieu aqueux).

L'utilisation des floculants solides ou en émulsion nécessite toujours une préparation particulière de mise en solution. Une dilution secondaire de ces produits est toujours nécessaire.

1.2.4.3. Domaines d'application

- **Eaux de surface**

En clarification, le floculant de synthèse est utilisé en combinaison avec un coagulant. Le meilleur polymère est générale

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ment un anionique ou un non-ionique ou un très légèrement cationique.

Un dosage de 0,05 à 0,5 g.m^{-3} est usuel. Dans certains cas particuliers d'eaux chargées (débourbage), on peut utiliser jusqu'à 2 g.m-3 3 de polymère.

- **Eaux résiduaires industrielles**

Pour un traitement avec coagulant minéral, un polymère anionique est en général employé jusqu'à 2 g.m^{-3} Dans certains cas particuliers (traitements de surface, sidérurgie, lavage des gaz), un polymère floculant cationique seul est souvent mieux adapté (0,5 à 5 g.m^{-3})

- **Eaux résiduaires urbaines** (traitements physico-chimiques)

En association avec un coagulant minéral, le meilleur floculant est en général de type anionique (jusqu'à 2 g.m^{-3}). Quand seule l'élimination des MES est recherchée, un floculant synthétique peut être utilisé seul.

- **Déshydratation des boues**

Les floculants cationiques sont généralement adaptés au traitement des boues organiques. Les boues à caractère minéral nécessitent des floculants anioniques. La consommation est comprise entre 0,5 et 7 kg de polymère par tonne de matière sèche.

1.3. FLOCULATION AVEC CONTACT DE BOUE

L'efficacité d'une floculation peut être symbolisée par

$$e = k\, C^{a}\, G^{ß} t^{Y}$$

e : efficacité de la floculation: paramètre lié au floc formé ou à la qualité de l'eau décantée,

C : concentration des boues dans le réacteur de floculation,

G : gradient de vitesse,

t : temps de contact,

a, ß, ? >0

En particulier, l'augmentation de la masse de contact (C) entraîne un accroissement de la probabilité des chocs au sein du réacteur, d'où une floculation plus efficace.

Les **appareils à contact** de boue, créant ou apportant dans la zone de floculation une masse de boue plus importante, utilisent ce principe.

Deux méthodes différentes sont appliquées:

- la recirculation de boue,
- le lit de boue.

Le contact de boue offre de très nombreux avantages:

- amélioration de la floculation: absence de fines particules, floc homogène et réduction du temps de floculation,
- accroissement de la vitesse de décantation et diminution de la taille des ouvrages correspondants,
- achèvement des réactions spécifiques (précipitation, adsorption sur charbon actif..),
- augmentation de l'élimination des matières organiques par adsorption sur le floc,
- économie des réactifs chimiques (meilleure utilisation des réactifs, effet coagulant et floculant des boues recyclées).

Le domaine d'application de la floculation avec contact de boue est très vaste: clarification, précipitations spécifiques (décarbonatation), décoloration, élimination du fer ou du manganèse, traitements biologiques aérobie ou anaérobie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans le cas particulier du traitement biologique par boues activées, l'apport de boue dans le réacteur a aussi un autre rôle. Il permet de maintenir la quantité de biomasse nécessaire à l'épuration.

Remarque: une concentration de boue trop importante dans le réacteur devient un facteur limitant de décantation.

1.3.1. Recirculation de boue

Il est nécessaire d'assurer une circulation régulière des boues sans turbulence excessive, de réaliser un mélange intime eau boue, et d'éviter tout dépôt de boues.

Un système intégré ou externe apporte en permanence les boues à un floculateur précédant la chambre de décantation. Il est nécessaire de recirculer des boues concentrées provenant du fond du décanteur. Divers systèmes de recirculation sont rencontrés: hydroéjecteur, hélice, turbine, pompe à émulsion, pompe externe, ...

Le décanteur est très souvent équipé d'un dispositif de raclage de boues.

1.3.2. Lit de boue

Dans un ouvrage à flux ascendant, un équilibre s'établit entre la vitesse de l'eau et la vitesse de décantation freinée des particules floculées. A partir d'une certaine concentration de celles-ci, il se crée un **lit de boue** qui joue à la fois les rôles de floculateur et de "filtre fluidisé", d'où une excellente floculation.

Ce lit présente alors une certaine cohésion naturelle et peut supporter des vitesses ascensionnelles supérieures à celle qu'accepterait une particule floculée isolée. Cette cohésion explique l'élasticité du lit de boue. En effet, il est comparable à un ressort qui tend à se comprimer sous l'action de la pesanteur (décantation des particules), mais qui s'étire plus ou moins sous l'action d'une force opposée (flux ascensionnel de l'eau brute). Le ressort se casse si la vitesse ascensionnelle est trop élevée, ce qu'il faut éviter en choisissant convenablement celle-ci.

Lorsque la vitesse ascensionnelle de l'eau est trop importante, la vitesse de décantation des particules n'est plus suffisante pour assurer une décantation freinée de l'ensemble, donc la cohésion du lit de boue. Le floc diffus est alors entraîné avec l'eau.

La cohésion est caractérisée par la détermination du coefficient K de cohésion de la boue (voir page 353) paramètre essentiel pour la connaissance et le dimensionnement d'un décanteur à lit de boue pulsé.

1.4. CAS PARTICULIER DES ÉMULSIONS

Les conditions de floculation des émulsions d'hydrocarbures ou d'huiles dépendent de la nature de celles-ci qui existent sous deux formes principales

- **émulsions mécaniques**, relativement instables et caractérisées, après prédécantation statique d'une heure, par une taille des micelles d'une dizaine à une centaine de microns et des concentrations d'environ 100 à 500 $mg.l^{-1}$.
- **émulsions chimiques**, relativement stables en raison soit de la nature des hydrocarbures (asphaltènes, naphténates),

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

soit de la coprésence d'agents dispersants (sels alcalins, détergents...). Elles sont caractérisables après décantation statique d'une heure, par une taille des micelles de 0,1 micron (micro-émulsions) à une dizaine de microns et une concentration en hydrocarbures très variable entre 100 $mg.l^{-1}$ (effluents de complexes pétrochimiques) et 50 $g.l^{-1}$ (fluides aqueux de coupe).

Le processus de coagulation de ces émulsions comporte, comme pour les colloïdes, une neutralisation du potentiel zêta, mais un mécanisme de coalescence peut être prédominant dans le cas d'émulsions mécaniques. Le traitement de celles-ci peut comporter une déstabilisation ou coagulation partielle directement suivie d'une filtration coalescente.

Le traitement des émulsions chimiques doit comporter une coagulation complète suivie d'une floculation et d'une séparation par décantation ou flottation à l'air dissous.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. PRÉCIPITATIONS CHIMIQUES

Les précipitations les plus fréquentes en traitement des eaux sont celles de carbonate de calcium et d'hydroxydes métalliques. Elles sont obtenues après adjonction d'un réactif spécifique.

2.1. ÉLIMINATION DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM

2.1.1. Méthodes principales

2.1.1.1. Décarbonatation à la chaux

Le but est d'éliminer la dureté bicarbonatée (ou temporaire) liée au calcium et au magnésium. La dureté non carbonatée (ou permanente soit: TH-TAC) n'est pas affectée.

- **Réactions de base**

Les réactions chimiques de décarbonatation sont les suivantes

$$Ca(OH)_2 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow \underline{2\ CaCO_3\downarrow} + 2\ H_2O$$

$$Ca(OH)_2 + Mg(HCO_3)_2 \rightarrow MgCO_3 + 2\ H_2O$$

Le carbonate de magnésium étant relativement soluble (de l'ordre de 70 $mg.l^{-1}$) un exès de chaux conduira à la réaction

$$Ca(OH)_2 + MgCO_3 \rightarrow \underline{CaCO_3\downarrow} + \underline{Mg(OH)_2\downarrow}$$

Si les doses de réactif sont exactement ajustées, on réduit l'alcalinité de l'eau à la solubilité théorique du système $CaCO_3{}^{+}$ $Mg(OH)_2$ qui est comprise entre 2° et 3°F dans les conditions usuelles de concentration et de température. Cependant, cette valeur limite du TAC peut se trouver augmentée dans la pratique par la présence d'impuretés dissoutes (ex.: acides organiques, ammonium, etc.).

Si, d'autre part, l'eau brute contient du bicarbonate de sodium (TAC > TH), il restera dans l'eau, en plus des valeurs données ci-dessus, une alcalinité supplémentaire sous forme de carbonate de sodium ou de soude caustique, correspondant à la valeur TAC - TH.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Mécanisme de la précipitation**

La réaction de la chaux sur une eau brute est extrêmement lente en l'absence de germes de cristallisation. Dans les décanteurs statiques sans dispositif de contact de boues, maintenant à peu près abandonnés, le temps de réaction est de plusieurs heures.

En revanche, dès que l'eau et la chaux sont mises en contact avec une masse suffisante de cristaux de $CaCO_3$ déjà précipités, la réaction atteint son point d'équilibre en quelques minutes. Du fait que la précipitation s'effectue sur les cristaux, ceux-ci ont tendance à augmenter de masse, les vitesses de sédimentation sont alors accrues, et les dimensions des appareils peuvent être réduites.

Ceci n'est valable que si les surfaces des cristaux de $CaCO_3$ restent suffisamment propres. Aussi, la présence de colloïdes organiques étant susceptible de gêner la cristallisation, est-il fréquent d'ajouter aux eaux brutes à décarbonater des **réactifs coagulants** pour coprécipiter les colloïdes.

Enfin, il faut insister sur le fait que le $CaCO_3$, lorsqu'il est seul, a tendance à former des agglomérats de cristaux denses décantant à forte vitesse, alors que la magnésie $Mg(OH)_2$, si elle est seule, se présente sous forme de flocons légers. Si ceux-ci sont en proportion notable, ils assurent un effet coagulant, mais la vitesse de décantation admissible est beaucoup plus faible qu'avec le seul $CaCO_3$.

L'appréciation d'un appareil de décarbonatation doit donc porter avant tout sur son aptitude à réaliser un mélange homogène de l'eau brute, des réactifs, et des germes de $CaCO_3$ dans une zone de réaction convenablement dimensionnée. Afin d'augmenter la vitesse de décantation, un floculant organique peut être injecté après la phase de croissance des cristaux. Lorsqu'on désire une eau décarbonatée parfaitement limpide, la décarbonatation doit toujours être suivie d'une filtration.

2.1.1.2. Emploi du carbonate de sodium

L'élimination de la dureté permanente est obtenue par le carbonate de sodium à froid, associé ou non avec la précipitation des bicarbonates de calcium et de magnésium par la chaux. Cette élimination se fait suivant les réactions

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow Na_2SO_4 + \underline{CaCO_3}\downarrow \quad (1)$$

$$CaCl2 + Na_2CO_3 \rightarrow 2NaCl + \underline{CaCO_3}\downarrow \quad (2)$$

Ce procédé présente un certain nombre d'inconvénients, en particulier celui de ne pas permettre d'abaisser le TAC au-dessous de 3 ou 4°F dans les cas les plus favorables.

2.1.1.3. Précipitation par la soude caustique

L'élimination des ions calcium et magnésium par précipitation par la soude caustique est une variante du procédé de traitement conjoint par la chaux et le carbonate de sodium, décrit en 2.1.1.2.

La réaction de base est la suivante

$$Ca(HCO_3)_2 + 2\ NaOH \rightarrow \underline{CaCO_3}\downarrow + Na_2CO_3 + 2\ H_2O \quad (3)$$

La précipitation du carbonate de calcium s'accompage de la formation de carbonate de sodium qui réagira sur la dureté permanente suivant les réactions (1) et (2) ci-dessus.

L'utilisation de la soude caustique permet donc d'abaisser la dureté d'une eau d'une valeur égale à deux fois la diminution de la teneur en bicarbonates alcalinoterreux. Le TAC de l'eau ne peut être abaissé à environ 3 à 4 °F que s'il existe suffisamment de dureté permanente pour se combiner avec le carbonate de sodium formé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.1.2. Calcul et contrôle de la précipitation (obtention d'un TAC minimal)

On appelle :
T_{ca} titre hydrotimétrique calcique en °F correspondant à la teneur globale en calcium,
TMg titre hydrotimétrique magnésien en °F correspondant à la teneur globale en magnésium,
C teneur en CO_2 libre exprimée en °F:

$$C = \frac{CO_2 \text{ libre mg.l}^{-1}}{4,4}$$

2.1.2.1. Dose de chaux

- **TH-TAC positif:** la dose théorique de chaux nécessaire pour obtenir la précipitation optimale du seul carbonate de calcium est:

$$CaO : 5,6 (TAC + C) \text{ g.m}^{-3}$$

ou

$$Ca(OH)_2 : 7,4 (TAC + C) \text{ g.m}^{-3}$$

Si on doit précipiter à la fois le carbonate de calcium et la magnésie, le **T_{Mg} étant supérieur à TH-TAC** (titre $Mg(CO_3H)_2 = TAC-T_{Ca}$)

$$CaO : 5,6 (2 TAC - T_{Ca} + C) \text{ g.m}^{-3}$$

ou

$$Ca(OH)_2 : 7,4 (2 TAC - T_{Ca} + C) \text{ g.m}^{-3}$$

- **TH-TAC négatif:** ceci concerne les eaux bicarbonatées sodiques. On peut toujours obtenir une bonne précipitation du calcium et du magnésium en calculant la chaux sur TAC + T_{Mg} + C, mais on produira ainsi une eau chargée en carbonate de sodium et en soude caustique, et on peut avoir intérêt à employer une dose plus faible.
- **Contrôle des résultats: dans tous les cas**, il faut augmenter (ou diminuer) la dose de chaux de 5,6 g par m^3 (en CaO) ou 7,4 g par m^3 (en $Ca(OH)_2$) par degré de TA mesuré en plus ou en moins autour de la règle théorique.

Bien entendu, les valeurs 5,6 et 7,4 s'entendent pour des produits à 100 %. En fait, les chaux sont toujours impures et plus ou moins carbonatées et les valeurs industrielles sont à majorer suivant les situations de 10 à 30%. Si on se borne à précipiter le carbonate de calcium, le réglage idéal est obtenu pour :

$$TA = \frac{TAC}{2} \pm 0,5 \text{ °F}$$

réglage qui correspond à un minimum de TAC de 2°F environ si l'eau ne contient pas de magnésium.

Si T_{Mg} est supérieur à TH-TAC, l'application de cette règle conduit à des TAC excessifs du fait de la solubilité du carbonate de magnésium et le résultat optimal est obtenu quand on a

$$TA = \frac{TAC}{2} + 0,5° \text{ à } 1 \text{ °F}$$

avec une valeur du TA aussi faible que possible.

2.1.2.2. Dose de carbonate de sodium

La dose de carbonate de sodium nécessaire est en produit pur

$$10,6 (TH - TAC) \text{ g.m}^{-3}$$

- **Contrôle des résultats:** en théorie, pour une eau exempte de magnésium on doit obtenir

$$TH = TAC = 2 TA$$

En pratique, si on a affaire à une eau dont la dureté permanente est en partie magnésienne, cette règle peut ne plus être observée et le problème doit alors être examiné cas par cas.

2.1.2.3. Dose de soude

Par degré de TAC à précipiter la dose de soude caustique à utiliser est, en produit pur, de

$$8 (2 TAC - T_{Ca} + C) \text{ g.m}^{-3}$$

- **Contrôle des résultats:** pour un abaissement de 1 °F du TAC on doit avoir une diminution du 2 °F du TH.

En pratique, on règle la dose de soude caustique introduite dans l'eau de façon à obtenir une valeur minimale du TAC résiduel.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2. PRÉCIPITATION DU SILICIUM

Il s'agit en fait de l'adsorption de la silice sur un floc abondant d'hydroxyde de Al, Mg ou Fe.

Cette coprécipitation peut s'effectuer à froid ou à chaud. Elle est souvent réalisée simultanément avec celle du $CaCO_3$ en décarbonatation d'eaux de forage.

2.2.1. Désiliciage par Mg II

Ce traitement peut se faire à froid ou à chaud.

Le plus fréquemment, le magnésium est initialement présent dans les eaux de forage et précipite lors de leur décarbonatation avec une partie de la silice. Un appoint de Mg peut être effectué par de la poudre de MgO qui se solubilise par carbonatation en Mg CO_3 à froid, ou est simplement dispersée à 100 °C.

Selon les analyses de l'eaubrute, la température et l'abattement recherché, des graphiques permettent le calcul de la dose de MgO (cf figure 34) réagissant et, par différence celle à apporter.

Cette dose, varie à froid de 3,2 à 1,8 mg de MgO par mg de SiO2 adsorbé, pour une concentration initiale de 20 à 40 $mg.l^{-1}$.

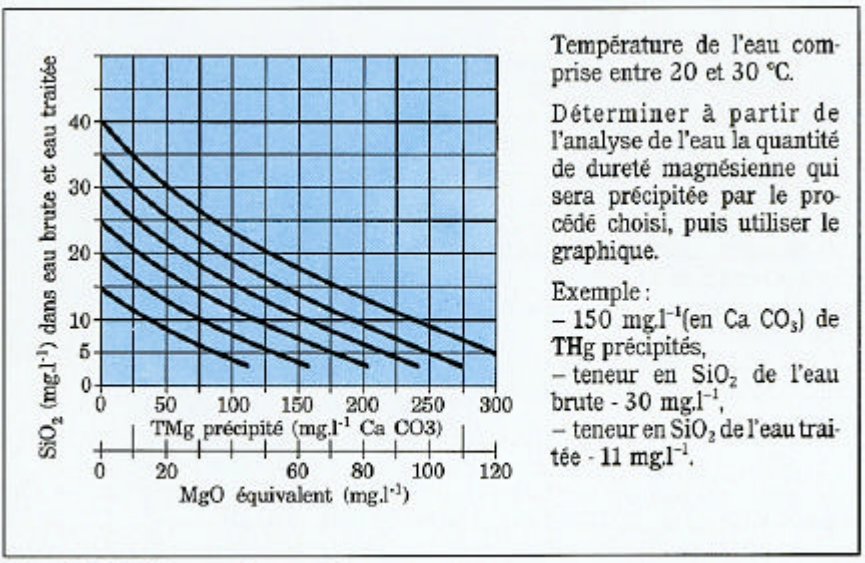


Figure 34. Désiliciage par la magnésie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.2. Désiliciage par l'aluminate de sodium

Ce traitement est de préférence effectué à froid (figure 35).

Les valeurs résiduelles obtenues sont plus élevées qu'avec MgO.

La dose d'aluminium exprimée en $A1_20_3$ est dans les eaux saumâtres de l'ordre de 2 à 2,6 mg par mg de silice coprécipitée.

En décarbonatation chaux-soude d'eau de forage, les taux résiduels de SiO_2 obtenus ont les ordres de grandeur suivants pour des teneurs initiales de 20 à 40 $mg.l^{-1}$ de silice

Figure 35. Désiliciage par l'aluminate

.

Réactif	**Température °C**	**pH**	**$Si0_2$ résiduel** $mg.l^{-1}$
MgO	50-55	9,6-10	4-6
$NaA1O_2^-$	30 - 35	8,6 - 9,5	5 - 10

La teneur initiale de l'eau en Mg, les prix des réactifs et les volumes produits de boues déterminent le choix entre les deux réactifs.

2.2.3. Désiliciage par le chlorure ferrique

L'utilisation de $FeCl_3$ en combinaison avec l'aluminate permet d'obtenir un aluminium résiduel de 0,2 à 0,3 $mg.l^{-1}$ à pH 8,5-9aulieudelà3$mg.1^{-1}$ avec l'aluminate seul.

2.2.4. Silice colloïdale

Bien que sa nature chimique soit controversée, il s'agirait de particules très fines d'argiles ayant un caractère électro-positif.

Les teneurs rencontrées sont de l'ordre de quelques centaines de $\mu g.l^{-1}$ dans les eaux de rivière dans les pays tempérés mais peuvent atteindre des dizaines de $mg.l^{-1}$ dans certains lixiviats acides d'hydrométallurgie.

Dans le cas des eaux naturelles, l'élimination peut être obtenue

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- par double floculation à deux pH différents avec coadsorption sur hydroxyde métallique.
- par filtration sur précouche ou mieux sur membrane MF ou UF. Dans le cas de lixiviats (hydrométallurgie), on doit recourir à des floculants non ioniques particuliers, compatibles avec les traitements en aval.

2.3. PRÉCIPITATIONS DES MÉTAUX

Elle concerne la précipitation des métaux dissous rencontrés principalement dans les effluents de traitement de surfaces, les lixiviats d'hydrométallurgie et les eaux de lavage de gaz de combustion de charbon et d'ordures ménagères.

Le procédé le plus fréquent consiste, par simple neutralisation de ces effluents acides, à précipiter les métaux sous forme **d'hydroxydes**. Les pH de précipitation maximale de tous les métaux ne coïncidant pas, on recherche une zone optimale de pH réactionnel (voir page 5 21) qui peut évoluer de 7 à 10,5 suivant les valeurs minimales recherchées pour l'élimination des métaux les plus nuisibles.

En coprécipitation de carbonates, sous forme d'hydroxycarbonates moins solubles, le seuil d'élimination peut être amélioré, ce qui est le cas du plomb.

Les valeurs résiduelles de métaux ionisés peuvent évoluer de 0,1 à 2 $mg.l^{-1}$ suivant les métaux et ceci indépendamment des hydroxy des pouvant rester en dispersoin colloïdale suivant la qualité de la floculation et de la décantation.

Les niveaux résiduels recherchés pour certains métaux (Cd, Ag, Hg) deviennent toutefois dans certains pays beaucoup plus sévères et descendent à des teneurs de moins de 100 ?$g.l^{-1}$.

La précipitation peut alors être effectuée sous forme **de composés soufrés** extrêmement peu solubles qui permettent de précipiter des métaux faiblement complexés (ammonium ou certains chelatants organiques) et dans une zone étroite de pH.

Cette précipitation est obtenue
- à partir de Na_2S et sous forme de sulfures colloïdaux qui exigent la coprésence d'hydroxyde de fer pour être floculés,
- ou à partir de dérivés de mercaptans organiques permettant une floculation moins difficile.

Dans des situations intermédiaires, on peut aussi bénéficier de l'excès d'un seul cation métallique, Fe^{3+} ou $A1^{3+}$ permettant une adsorption (Cd, Se mais aussi B, As) ou recourir préalablement à un oxydant très puissant pour casser les complexants forts comme l'EDTA (voir page 156)

2.4. AUTRES PRÉCIPITATIONS

2.4.1. Sulfates

La précipitation des sulfates peut être imposée avant rejet en égout (altération du béton) ou recyclage (adoucissage). Les sulfates doivent aussi être souvent éliminés de saumures ou d'eaux avant distillation.

Le procédé le plus fréquent et qui concerne de fortes teneurs en $S0_4^{2-}$ consiste en la **précipitation du gypse** $CaSO_4$, $2H_2O$, à froid, par l'addition de Ca^{2+} sous forme de chaux (cas fréquent des eaux acides) ou de $CaCl_2$ (cas des saumures) :

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

$$SO_4^{2-} + Ca^{2+} + 2\,H_2O \rightarrow \underline{CaSO_4, 2\,H_2O}\downarrow$$

Dans les deux cas, la précipitation sous forme de cristaux hétérogènes est très lente. Pour éviter les sursaturations et les post précipitations dangereuses, la réaction doit s'effectuer en présence d'une très forte concentration en germes.

Les concentrations en SO_4^{2-} obtenues dépendent de la salinité, de l'activité du milieu et de l'apport de Ca" qui, dans le cas de la chaux, est limité par l'acidité à neutraliser. Le diagramme de la figure (cf chapitre 8, § 3.2.4) donne les ordres de grandeur des produits de solubilité développés selon la nature des sels présents. Par exemple, on obtient les teneurs résiduelles:

- 2 à 3 $g.l^{-1}$ SO_4 en épuration de saumures, avec recours à $CaCl_2$,
- 1,5 à 2 $g.l^{-1}$ SO_4 en neutralisation d'eau acide et sans recourir à $CaCl_2$.

Un second procédé est la précipitation de sulfate de baryum à partir de l'addition de BaCl2. Les solubilités résiduelles obtenues sont inférieures à 20 $mg.l^{-1}$ mais le réactif est très coûteux et son emploi rare.

2.4.2. Fluorures

Leur élimination par précipitation concerne des effluents acides de lavage de gaz d'incinération ou de métallurgie de l'aluminium et aussi ceux de l'industrie de l'acide phosphorique et du verre. Dans ces deux derniers cas, la présence de F` est toujours liée à une concentration importante de silice qui modifie les conditions de précipitation. L'agent de neutralisation sera toujours la chaux, éventuellement complétée par du $CaCl_2$, si l'on doit obtenir de faibles valeurs résiduelles de F^-

$$2\,F^- + Ca^{2+} \rightarrow \underline{CaF_2}\downarrow$$

Avec une pollution principalement fluorée et sulfurique ou chlorhydrique, le précipitat est à base de CaF_2 dont la cristallisation et la précipitation présentent des cinétiques intermédiaires entre celles de $CaCO_3$ et du gypse. Le dimensionnement des appareils est assez proche de celui des appareils de décarbonatation mais le temps de réaction est plus long.

En précipitation par seul apport de chaux, la solubilité de la CaF_2 dépend du pH pour une salinité donnée (cf figure 36). Elle dépend aussi du procédé

- de 16 à 30 $mg.l^{-1}$ en effluents de galvanoplastie,
- de 2 à 5 $mg.l^{-1}$ en effluents de fabrication d'acide phosphorique, mais grâce à l'adsorption de F^- sur l'hydroxyapatite précipitée,
- de 20 à 40 $mg.l^{-1}$ en effluents salins. - **L'aluminium dissous** en concentration notable est un élément complexant défavorable. Réciproquement, lors de la coprécipitation massive d'$Al(OH)_3$ ou $Mg(OH)_2$, ces hydroxydes adsorbent des fluorures et peuvent en diminuer la solubilité résiduelle.

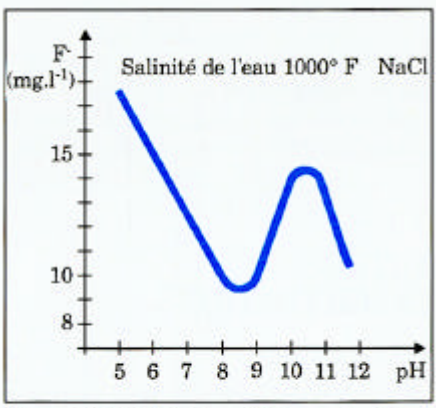


Figure 36. Précipitation du fluorure par la chaux en milieu NaCl.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- Avec **présence importante de silice**, une réaction parallèle s'ajoute

$$SiF_6^{2-} + 4\ OH^- \rightarrow \underline{SiOH_4} + 6\ F^-$$

Les concentrations en F^- obtenues dépendent de l'enrichissement en Ca` du milieu.

La précipitation du gel de silice, abondant et fortement hydraté, est lente et c'est l'épaississement de la boue qui détermine le dimensionnement du décanteur.

2.4.3. Phosphates

Ces sels peuvent être présents dans les eaux sous des formes et des concentrations variables

- acide phosphorique des effluents d'usine d'engrais phosphatés avec présence de HF et de $Si0_2$,
- phosphates des eaux usées domestiques,
- phosphates des purges de chaudières, - polyphosphates et hexamétaphosphate de circuits de refroidissement (Cf. p. 154).

Deux modes de précipitation sont envisageables:

- effluents acides: par la chaux,
- eaux non acides: par des sels d'Al ou Fe (formation de phosphates métalliques).

2.4.3.1. Précipitation par la chaux

En fonction de l'acidité initiale on peut avoir deux réactions

- précipitation de dihydrogéno-phosphate de calcium à un pH optimal de 6 à 7

$$2\ H_3PO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow \underline{Ca(PO_4H)_2} + 2\ H_2O$$

Ce composé décante assez rapidement mais présente une solubilité résiduelle élevée (130 à 300 $mg.l^{-1}$ P_2O_5 selon la température);

- précipitation de phosphate tricalcique à un pH de 9 à 12 :

$$2\ Ca(PO_4H)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow \underline{Ca_3(PO_4)_2} + 2\ H_2O$$

Le phosphate tricalcique présente une solubilité résiduelle de quelques $mg.l^{-1}$ en P_2O_5 mais sous forme colloïdale. Il précipite lentement sans l'addition d'un floculant.

Le magnésium éventuellement présent a une action plus complexe

- au-dessous de pH 9, la solubilité du phosphate de calcium augmente avec sa concentration,
- au-dessus de pH 10, le phosphate de calcium coprécipite avec la magnésie avec des valeurs résiduelles inférieures à 1 $mg.l^{-1}$.

2.4.3.2. Précipitation par $A1^{3+}$ ou Fe^{3+}

$AlPO_4$ et $Fe\ P0_4$ sont des sels très peu solubles mais qui précipitent à l'état colloïdal. Le précipité est éliminé par adsorption sur un excès d'hydroxyde métallique (cf. figure 3 7).

Les valeurs résiduelles en P obtenues peuvent être inférieures au $mg.l^{-1}$ en impliquant des doses de sels de fer et d'aluminium relativement élevées.

.

pH de précipitation des phosphates

Réactif	pH	Remarques	Nature du précipité
$Ca(OH)_2$	9 à 12	+ Floculant	Hydroxyapatite
Fe^2	5	+ excès d'hydroxyde	Phosphates + Hydroxyde du métal
$A1^{3+}$	6		

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

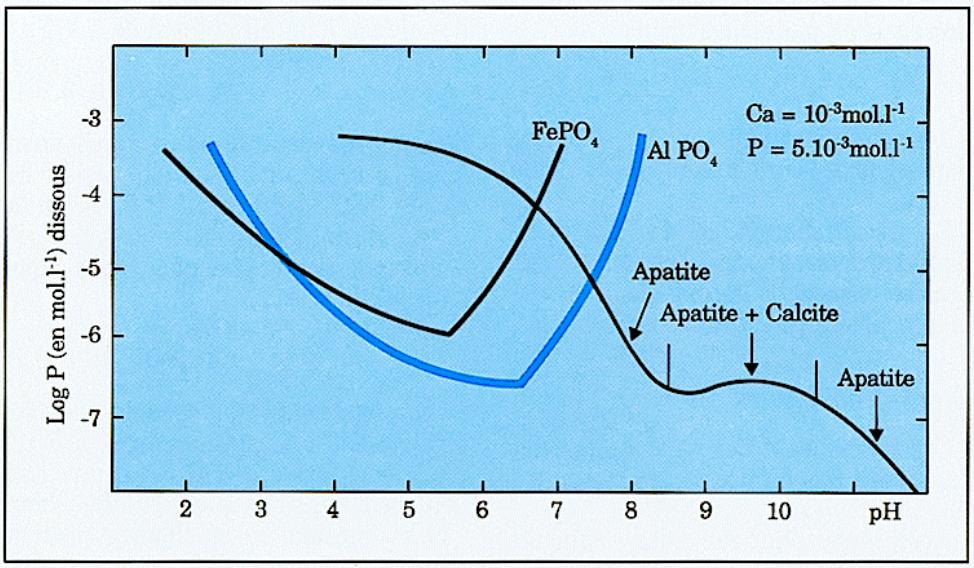


Figure 37. Diagramme des solubilités des phosphates de Fe, A1 et Ca.

2.5. INHIBITIONS DE LA PRÉCIPITATION

La précipitation chimique peut être ralentie par certains composés présents naturellement dans les eaux. C'est **l'inhibition naturelle** qui est gênante si cette précipitation est souhaitée.

Si au contraire, celle-ci doit être évitée, **l'inhibition** peut être **provoquée** par l'ajout d'inhibiteurs.

2.5.1. Inhibitions naturelles

La coprésence de composés minéraux ou organiques qui peuvent, soit former des complexes relativement solubles avec les ions à précipiter, soit disperser les produits de la précipitation, inhibe celle-ci en la retardant ou en déplaçant la solubilité.

- **En décarbonatation**

- aux pH élevés de décarbonatation NH_4 est déplacé en NH_4OH, ce qui augmente donc la valeur du TAC résiduel,
- certains acides organiques, humiques ou fulviques, forment avec le calcium des complexes solubles qui augmentent la dureté résiduelle,
- dans le cas d'eaux de surface polluées par des effluents urbains, la présence de polyphosphates (agents séquestrants) ralentit le temps de germination et de croissance des cristaux et provoque en conséquence, leur dispersion sous forme colloïdale.

- **En traitement d'eaux résiduaires industrielles**, telles celles de lavage de gaz, la présence simultanée de cations métalliques (Ni", Zn", etc.) et de NH_4^+ détermine la formation de complexes métallo-ammoniacaux relativement stables.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **En déferrisation physico-chimique**, la présence de silice augmente considérablement les temps de précipitation de l'hydroxyde.

2.5.2. Inhibition provoquée dispersion

2.5.2.1 Propriétés principales

Les produits utilisés peuvent avoir différentes actions.

- **Inhibition de la cristallisation**

Action antitartre sur des solutions sursaturées, par l'addition de faibles doses d'inhibiteurs de l'ordre du $mg.l^{-1}$. Il y a allongement du temps de germination et ralentissement de la croissance des germes (cf. figure 38) : c'est l'effet de seuil.

- **Distorsion du réseau cristallin**

Action sur la vitesse de croissance en modifiant le faciès de la variété allotropique du précipité qui présente moins de risques d'adhérence sur les parois et donc d'entartrage.

- **Pouvoir dispersant**

Aptitude à maintenir en suspension à l'état divisé des particules solides qui auraient tendance à s'agglomérer. Elle est due à l'adsorption sur les particules ou à l'action sur leurs charges électriques.

Certains produits, utilisés à forte dose, ont la capacité de remettre en solution ou en suspension des sels déjà précipités sur les parois (nettoyage partiel ou aide au détartrage).

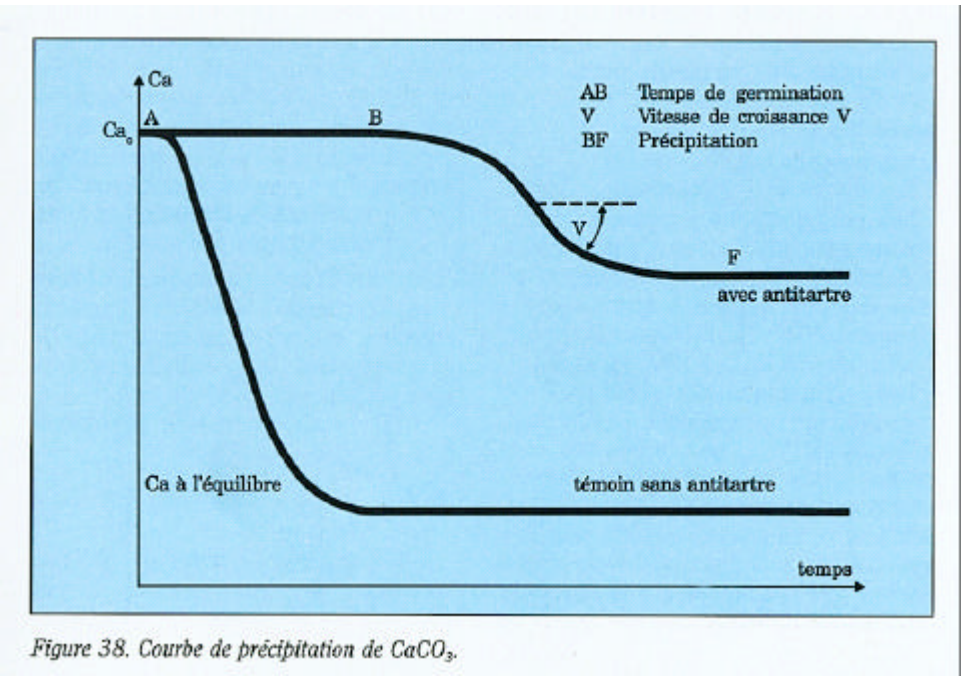


Figure 38. Courbe de précipitation de $CaCO_3$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

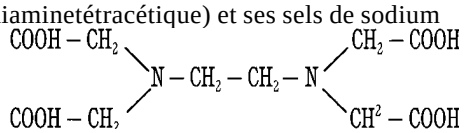
- **Pouvoir complexant (ou séquestrant)** Propriété d'intégrer dans leur molécule des anions ou des cations pour former, malgré la présence d'un agent précipitant, de nouveaux composés solubles stables.

La complexation nécessite de grandes quantités de produit, par exemple 50 g de phosphate environ par °F de Ca pour 1000 m^3 d'eau à 20 °F de TH.

2.5.2.2. Principaux composés

- **Les complexants ou chelatants**

Tels l'EDTA (acide éthylène-diaminetétracétique) et ses sels de sodium



Ils ont été utilisés surtout dans les eaux de chaudière contenant des traces de dureté, ou lors d'opération de détartrage mais leur mise en oeuvre est délicate. Pour des raisons économiques, on utilise plutôt "l'effet de seuil" dans les traitements préventifs, en particulier dans les circuits de refroidissement, en faisant appel aux autres familles

- **Les polyphosphates**

Ils constituent la famille la plus connue.

Les polyphosphates proprement dits ont une structure linéaire et pour formule générale $M_{n+2}\ P_n,\ O_{3n+1}$• Les premiers termes de la série des sels de sodium sont le pyrophosphate : $Na_4P_2O_7$ puis le tripolyphosphate, $Na_4P_2O_7$, $NaP0_3$ ou $Na_5P_3O_{10}$.

Les polymétaphosphates ont une structure cyclique et répondent à la formule générale $(MP0_3)_n$ Les termes les plus connus sont le trimétaphosphate $(NaPO_3)_3$ et l'hexamétaphosphate $(NaP0_3)_6$. Les produits commerciaux vendus sous ces appellations sont souvent des mélanges dont le préfixe représente le degré de condensation moyen.

L'action retardatrice est franche vis-à-vis du carbonate de calcium, un peu moins vis-à-vis de la magnésie et du sulfate de calcium.

Habituellement, pour stabiliser une eau ayant des TH et TAC de l'ordre de 20 °F, on utilise environ 2 $g.m^{-3}$ de polyphosphate. Cette dose augmente avec le TH, le TAC, la turbidité et la température d'utilisation. La réglementation française pour l'eau potable impose un maximum de 5 $g.m^{-3}$ de polyphosphate, exprimé en P_20_5.

Les polyphosphates sont offerts sur le marché sous trois formes principales

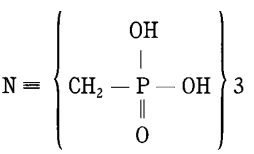
- les polyphosphates cristallins, aisément solubles,
- les polyphosphates "vitreux",
- les polyphosphates liquides.

Les polyphosphates peuvent se décomposer progressivement par hydrolyse en donnant naissance à des ions orthophosphates $P0_4^{3-}$:La vitesse **d'hydrolyse** augmente avec la température et l'acidité du milieu, sans que l'on puisse parler d'un seuil précis au-delà duquel les polyphosphates sont détruits; leur efficacité anti-tartre devient aléatoire au-delà de 60 °C. A température élevée, en présence de calcium, il y a aussi risque de formation de phosphate tricalcique très peu soluble.

- **Les dérivés organiques du phosphore**

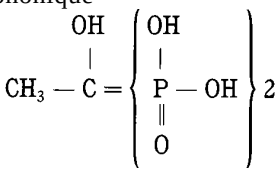
Les plus connus sont les phosphonates, largement utilisés dans les circuits de refroidissement. On en distingue deux types principaux

- l'AMP, acide amino-tri méthylène-phosphonique



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

l'HEDP, acide hydroxyéthane diphosphonique



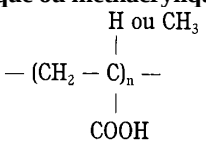
Ces composés sont en général commercialisés sous forme de solutions concentrées. Ils sont stables bien au-delà de 100°Cet sensibles à la présence de chlore libre. Non toxiques, leur emploi en eau potable est cependant subordonné à l'agrément des autorités compétentes.

Les doses d'emploi varient d'abord avec les caractéristiques et conditions d'utilisation de l'eau, mais aussi d'un produit commercial à l'autre. En moyenne, elles sont de l'ordre de 1 $g.m^{-3}$ en $P_2 0_5$, soit environ 10 $g.m^{-3}$ en produit commercial.

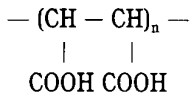
La liaison P-C-P plus stable que la liaison P-O-P permet de les utiliser à des températures élevées supérieures à 130 °C comme dans les évaporateurs.

- **Les polymères organiques de synthèse** Plus récents, ils ont un grand développement dans le conditionnement des eaux, avec comme familles principales :

Type acrylique ou méthacrylique



Type maléique



Les polymères sont des mélanges de molécules de différentes tailles. La définition d'un polymère passe par la connaissance de sa masse molaire et de la répartition des masses molaires.

Quelques propriétés à signaler -caractère anionique,

- les poids moléculaires voisins de 10^3 pour les antitartres dispersants, 10^4 pour les dispersants,
- meilleur pouvoir dispersant que les polyphosphates et les phosphonates,
- bonne stabilité à la température (> 150°C) et au chlore,
- facilement biodégradables après le rejet

Les formulations comportent souvent des copolymères ou des terpolymères pour renforcer l'efficacité selon l'application recherchée.

- **Autres dispersants**

Les naphtalène et polystyrène sulfonates présentent un caractère anionique et peuvent être associés aux polyphosphates et aux phosphonates.

Le tanate de sodium, dérivé du bois, est utilisé dans les chaudières B.P. et M.P. à une dose de 2 $g.m^{-3}$ par °F de calcium.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. DÉCANTATION

La décantation est la méthode de séparation la plus fréquente des MES et des colloïdes (rassemblés sous forme de floc après une étape de coagulation-floculation).

3.1. DIFFÉRENTS TYPES DE DÉCANTATION

Divers types de matières décantables sont à distinguer

- **les particules grenues** décantent indépendamment les unes des autres avec chacune une vitesse de chute constante,
- **les particules plus ou moins floculées** ont des tailles et des vitesses de décantation variables. Lorsque la concentration est faible, la vitesse de chute augmente au fur et à mesure que les dimensions du floc s'accroissent par suite de rencontres avec d'autres particules, c'est la **décantion diffuse**.

Pour des concentrations plus élevées, l'abondance des flocs crée une décantation d'ensemble freinée, le plus souvent caractérisée par une interface nettement marquée entre la masse boueuse et le liquide surnageant: c'est la **décantation en piston.**

3.1.1. Décantation des particules grenues

C'est le cas le plus simple, le seul facilement décrit par des équations.

3.1.1.1. Théorie

Lorsqu'une particule grenue est laissée dans un liquide au repos, elle est soumise à une force motrice F_M (pesanteur) et à une force résistante F_T (traînée du fluide) résultante des forces de viscosité et d'inertie

$$F_M = (\varrho_s - \varrho_l)\, g^V \quad \uparrow F_t$$

$$F_T = \frac{Cs\ \varrho_l\ v^2}{2} \quad \downarrow F_M$$

Q_S, Q_l: masses volumiques de la particule grenue et du fluide,
d,s,v : diamètre, surface et volume de la particule grenue,
V : vitesse de décantation de la particule,
g: accélération de la pesanteur,
C : coefficient de traînée (adimensionnel). Très vite un équilibre s'établit et la décantation de la particule assimilée à une sphère se fait à vitesse constante V_o

$$V_o^2 = \frac{4}{3}\frac{(\varrho_s - \varrho_l)\, gd}{C\varrho_l}$$

3.1.1.2. Régime hydraulique

La valeur de C, **coefficient de traînée**, est définie par la perturbation, elle-même fonction de la vitesse de chute. Cette perturbation est caractérisée par le nombre **de Reynolds de grain** défini par

$$Re = \frac{\varrho_l V d}{\eta}$$

Re = adimensionnel,
avec ? = viscosité dynamique.
Si Re est petit, les forces de viscosité sont bien supérieures aux forces d'inertie.
Si Re est grand, les forces de viscosité sont négligeables.

Le coefficient de traînée est donné par :
$C = a\, Re^{-n}$ avec a et n constantes.

Re	Régime	a	n	c	Formule
$10^{-4} < Re < 1$	Laminaire	24	1	$24.\ Re^{-1}$	Stokes
$1 < Re < 10^3$	Intermédiaire	18,5	0,6	$18,5\ Re^{-6}$	Allen
$10^3 < Re < 2.10^5$	Turbulent	0,44	0	0,44	Newton

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le tableau ci-contre donne les différentes valeurs de a, n et C en fonction du nombre de Reynolds (abaques également disponibles).

Ces formules sont à la base du calcul du mouvement des grains dans un fluide et sont utilisées en décantation (solides grenus dans un liquide, gouttes d'eau dans l'air), en ascencion (bulles d'air dans l'eau, gouttes d'huile dans l'eau), en centrifugation, en fluidisation.

En régime laminaire, la loi de Stokes donne:

$$V_o = \frac{g}{18\eta} \cdot (\varrho_s - \varrho_1)\, d^2 \text{ en unités S.I.}$$

.3.1.1.3. Facteur de sphéricité

Ce facteur y est donné par ?

$$\psi = \frac{\text{Volume de la spère de même surface}}{\text{Volume du grain}}$$

Valeurs de ?	
Sable	2
Charbon	2,25
Talc	3,25
Gypse	4
Lamelles de graphite	2 2
Mica	170

Il faut dans les opérations précédentes remplacer c par c' = ? c.

3.1.1.4 Conditions de capture

- **Décantation à flux vertical**

Les particules dont la vitesse de sédimentation est supérieure à la vitesse ascendante du liquide sont retenues.

- **Décantation à flux horizontal** (figure 39)

-Soit un décanteur rectangulaire de longueur L et de section verticale s (où H est la hauteur d'eau et 1 la largeur), traversé uniformément par un débit Q.

- La vitesse d'une particule entrant dans le bassin à son niveau supérieur a deux composantes

VI : vitesse horizontale du fluide égale à Q/s,

V_O: vitesse verticale limite donnée par la loi de Stokes.

Cette particule est retenue dans le bassin si

$$\frac{Vo}{H} > \frac{V_1}{L} = \frac{Q}{H.1.L}$$

$$\text{Soit : } V_o > \frac{Q}{S_H} = V_H$$

S_H : surface horizontale du bassin,

V_H : vitesse de Hazen (ou charge hydraulique superficielle).

Il est à noter que VH est indépendant de la profondeur du bassin.

Toutes les particules ayant des vitesses de sédimentation supérieures à V_H seront théoriquement éliminées. Toutefois, si l'alimentation en eau est répartie sur toute sa hauteur, une partie des particules ayant une vitesse de décantation V inférieure à la vitesse de Hazen sera aussi retenue dans le rapport V/V_H. Dans

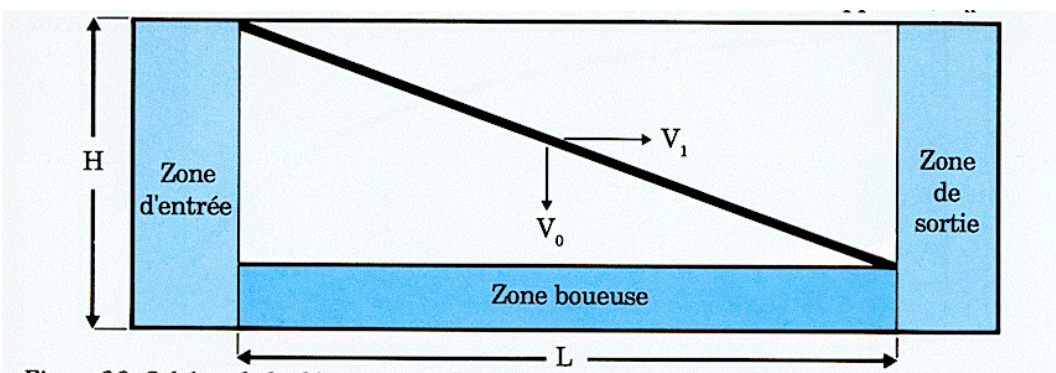


Figure 39. Schéma de la décantation à flux horizontal (particules grenues).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

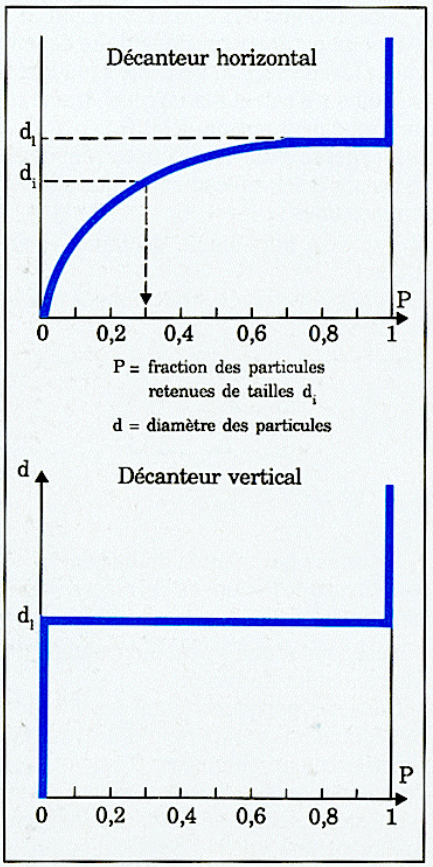


Figure 40. Efficacité comparée des décantations horizontale et verticale (particules grenues).

un décanteur à flux vertical, ces particules ne seraient pas retenues.

Théoriquement, à surface horizontale égale, un décanteur à flux horizontal permet donc la séparation d'un plus grand nombre de particules (figure 40).

Dans la pratique, cette différence est atténuée, voire inversée, pour les raisons suivantes liées à la décantation à flux horizontal

- difficulté de répartition hydraulique sur un plan vertical aussi bien à l'entrée qu'à la sortie de l'ouvrage,
- accumulation et collecte des boues,
- dans un décanteur circulaire à flux horizontal, la composante horizontale de la vitesse de la particule (V_1) diminue du centre vers la périphérie et sa trajectoire devient curviligne.

3.1.2. Décantation dise des particules floculées

Lors de la décantation, la floculation se poursuit et la vitesse de sédimentation des particules V_o augmente (figure 41).

Ce processus se produit dès que la concentration en matières floculées est supérieure à environ 50 $mg.l^{-1}$.

L'efficacité de la décantation diffuse est liée non seulement à la charge hydraulique superficielle, mais aussi au temps de séjour. Il n'existe pas de formule mathématique permettant le calcul de la

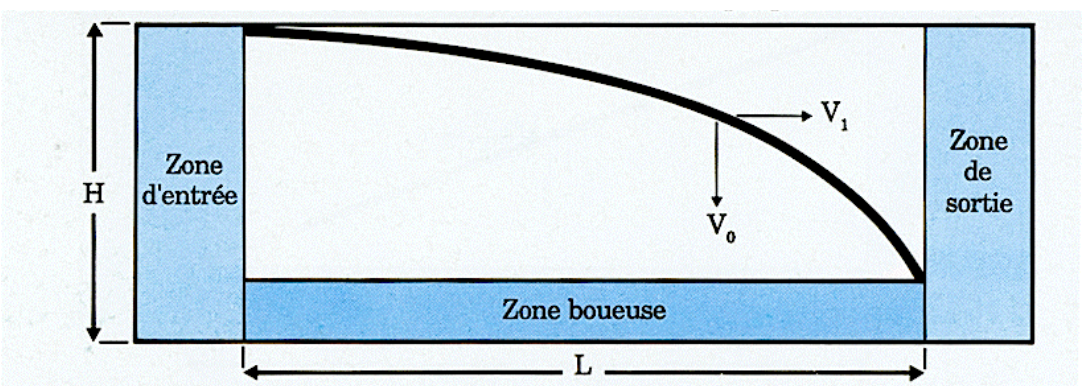


Figure 41. Schéma de la décantation à flux horizontal (particules floculées).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

vitesse de décantation. Des essais de laboratoire et des méthodes graphiques permettent alors de connaître cette vitesse. La figure 42 donne les résultats d'un tel essai.

3.1.3. Décantation en piston des particules floculées

Dès que la concentration en particules (loculées devient importante, les interactions entre particules ne sont plus négligeables. La décantion est freinée. Les particules adhèrent entre elles et la masse décante en piston avec formation d'une interface nette entre les flocs et le liquide surnageant.

Ce phénomène est caractéristique des boues activées et des suspensions chimiques floculées quand leur concentration est supérieure à environ 500 $mg.l^{-1}$.

3.1.3.1. Observation visuelle

Quand on réalise une décantation en piston dans un tube de hauteur et de diamètre suffisants (au minimum une éprouvette de un litre), on observe généralement l'apparition de quatre zones (figure 43).

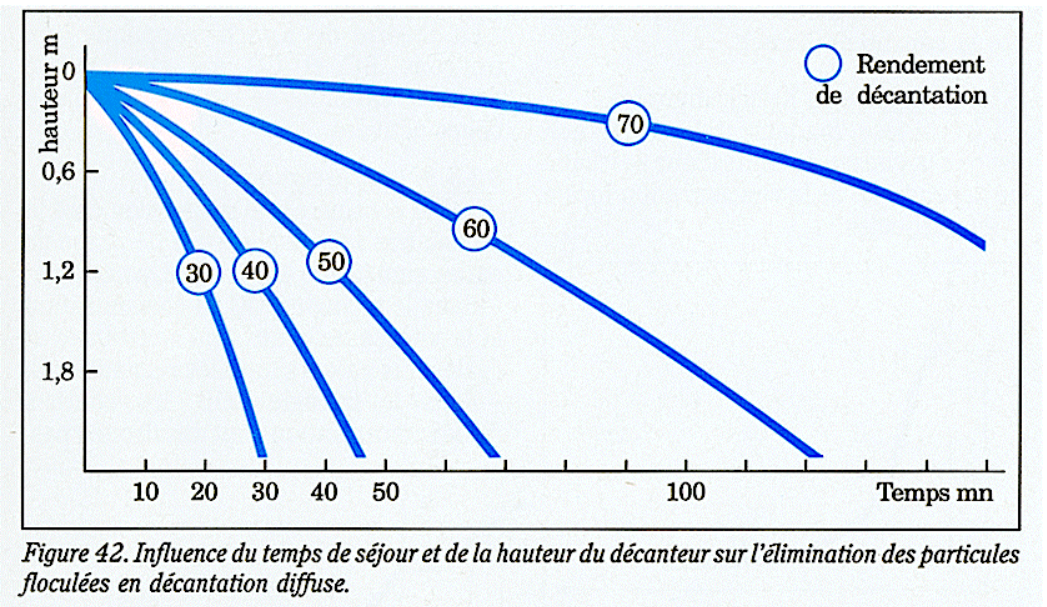


Figure 42. Influence du temps de séjour et de la hauteur du décanteur sur l'élimination des particules floculées en décantation diffuse.

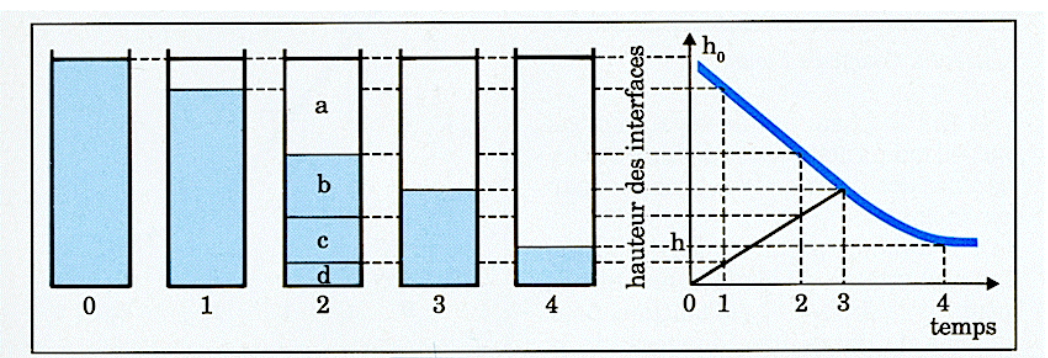


Figure 43. Schéma de la décantation en piston.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

a : Zone de clarification où le liquide est clair.
b : Zone de suspension homogène de même aspect que la solution de départ avec une interface a-b nette.
c : Zone de transition (pas toujours observable).
d : Zone d'épaississement des boues dont le niveau augmente rapidement avant de diminuer lentement.

A partir d'un certain état, les zones b et c disparaissent, c'est le point critique. L'évolution de la hauteur de l'interface a-b, puis a-d en fonction du temps, constitue **la courbe de Kynch.**

3.1.3.2. Courbe de Kynch (figure 44)

L'hypothèse fondamentale de Kynch est que la vitesse de chute d'une particule 162 ne dépend que de la concentration locale C en particules.

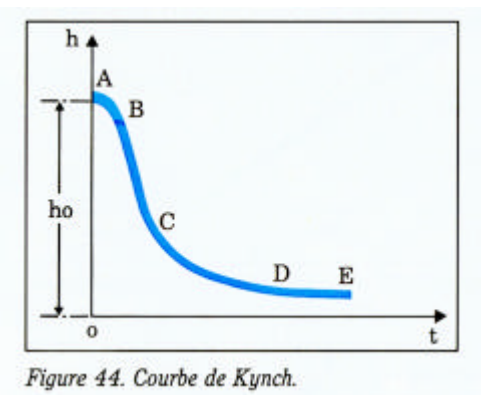


Figure 44. Courbe de Kynch.

De A à B, la surface de séparation est plus ou moins nette: c'est la phase de coalescence des flocons. Cette phase est parfois inexistante.

De B à C, une partie rectiligne qui traduit **une vitesse de chute constante** V_o (pente de la droite). V_o est fonction, pour un tube de dimensions données, de la concentration initiale en MES et des caractéristiques de floculation de la suspension. Lorsque, la concentration initiale C_o augmente, la vitesse de décantation V_o de la masse diminue: par exemple, pour une boue activée urbaine dont la concentration en MES passe de 1 à 4 $g.l^{-1}$, V_o varie de 6 à 1,8 $m.h^{-1}$.

Le tronçon CD, concave vers le haut, correspond à un ralentissement progressif de la vitesse de chute de la couche supérieure du dépôt.

A partir de D, les flocons se touchent en exerçant une compression sur les couches inférieures.

La théorie de Kynch s'applique aux tronçons BC et CD qui couvrent le domaine essentiel de la décantation des boues activées.

3.1.3.3. Interprétation

Si l'on considère une suspension dont la décantation ne comporte pas de phase de coalescence (figure 45) le calcul montre que
- dans le triangle BOC, la concentration et la vitesse de chute sont constantes et égales aux valeurs initiales régnant en B,
- dans le triangle COD, les courbes d'équiconcentration sont des droites pas

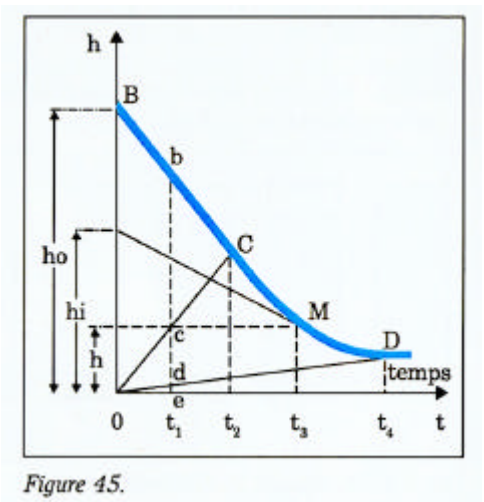


Figure 45.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sant par l'origine, ce qui signifie que, dès les premiers moments de la décantation, les couches les plus voisines du fond sont amenées à passer par toutes les concentrations comprises entre la concentration initiale et celle correspondant au point D, début de la compression.

Le milieu boueux de hauteur eb, à l'instant t1 présente donc trois zones distinctes
- une zone supérieure bc où la concentration et la vitesse de chute sont uniformes et ont gardé leurs valeurs initiales C_o et V_o,
- une zone intermédiaire cd dans laquelle la concentration augmente progressivement de c en d et la vitesse de chute diminue en conséquence,
- une zone inférieure de où les flocons de boues se touchent et sont soumis à la compression.

Dans le milieu considéré au temps t_2 la zone supérieure disparaît, et au temps t_4 la zone inférieure seule subsiste.

Pour le point M de la partie CD, deux concentrations peuvent être définies
$C_M^{\ i}$ concentration à l'interface
C_M concentration moyenne
D'après l'hypothèse de Kynch

$$C_M^{\ i} = C_0 \frac{ho}{hi}$$

Par ailleurs :

$$C_M = C_0 \frac{ho}{h}$$

Les trois parties BC, CD et DE de la courbe de Kynch (figure 44) trouvent leur application dans le calcul des ouvrages en sédimentation freinée. La phase BC correspond au domaine des décanteurs à contact de boue. La phase CD est relative aux ouvrages dans lesquels une concentration de la boue est recherchée (appareils à recirculation de boues épaissies).
La phase DE est exploitée pour l'épaississement de boues.

- **Indices de Mohlman (Sludge Volume Index: SVI)**

Un point particulier est considéré sur la courbe de Kynch, celui d'abscisse 30 minutes: l'indice de Mohlman IM destiné principalement à la caractérisation des boues biologiques.

$$I_M = \frac{V}{M}$$

V : Volume de boue après 30 min de décantation (cm3).
M : MES présentes dans ce volume (g).

Pour une même boue, l'indice de Mohlman dépend en partie des caractéristiques géométriques de l'éprouvette d'essai, mais surtout de la concentration initiale de la boue. C'est pourquoi, il est recommandé si nécessaire de diluer au préalable la boue avec de l'eau épurée pour que le volume final soit voisin de 250 ml (dans une éprouvette de un litre). Le maintien d'une lente agitation pendant l'essai est prévu dans certains protocoles mais son intérêt est aléatoire. Les boues activées de bonne décantabilité possèdent des indices de Mohlman de 50 à 100 $cm3.g^{-1}$

3.2 CALCUL DES DÉCANTEURS

La surface d'un décanteur est déterminée à l'aide de deux critères :

- la charge hydraulique superficielle caractérisant le volume d'effluent à traiter par unité de surface et de temps ($m^3/m^2.h$),
- le flux massique caractérisant la quantité de MES à décanter par unité de surface et de temps ($kg/m^2.h$).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.1. Influence de la charge hydraulique superficielle

Cette charge est directement liée à la vitesse de décantation des MES. Les paragraphes précédents indiquent que cette vitesse est déterminée par la loi de Stokes dans le cas de particules grenues et peut être mesurée facilement dans le cas de la décantation diffuse de particules floculées.

Le dimensionnement des décanteurs ne dépend dans ces cas que de la charge hydraulique superficielle.

3.2.2. Influence du flux massique

Dans le cas de la décantation freinée des particules floculées où les phénomènes d'épaississement interviennent, le flux massique est généralement déterminant pour le calcul de la surface de décantation.

Soit un décanteur de section S alimenté par un débit d'entrée Q_E avec la concentration en MES C_E; les boues sont soutirées à sa partie inférieure à un débit Q_S avec la concentration C_S.

En l'absence de réactions chimiques ou biologiques influençant les concentrations en MES, et en considérant un rendement d'élimination de 100 %, on a:

- débit traité $Q = Q_E - Q_S$
- bilan matières $Q_S C_S = Q_E C_E$

ou en flux massique :

$$\frac{Q_S C_S}{S} = \frac{Q_E C_E}{S}$$

Le flux massique décantable est donné par la courbe de Kynch. Pour un point particulier de la courbe de Kynch de concentration C_i, la vitesse V_i de décantation est donnée par la tangente à ce point. Le flux correspondant est $F_i = C_i V_i$

A ce flux F_i, il faut ajouter le flux de soutirage F_S donné par $C_i V_s$ avec $Vs = Q_s/S$. Le flux massique total est $F = C_i V_i + C_i V_s$

La figure 46 indique l'évolution de ces différents flux. Le flux F présente un minimum F_L, associé à une concentration critique C_L, imposant une section minimale S_m pour le décanteur telle que

$$Sm = \frac{Q_E C_E}{F_L}$$

Ce point particulier L peut être déterminé directement sur la courbe de flux massique F (figure 46 c) par

$$\left(\frac{dF}{dC_i}\right)_L = \left(\frac{dF_i}{dC_i}\right)_L + V_S = 0$$

Le point L est donc le point de la courbe de flux Fi où la tangente est égale en valeur absolue à la vitesse de soutirage V_s (figure 46 a). Ces résultats peuvent être exprimés différemment en considérant la courbe de Kynch. Le flux limite F_L au point L est donné par :

$$F_L = C_L (V_L + V_S) =$$

$$C_L\left(V_L + \frac{Q_E C_E}{S} \times \frac{1}{C_S}\right)$$

VL étant la vitesse de décantation au point L. Soit, pour que la décantation soit possible :

$$\frac{Q_E C_E}{S} < \frac{V_L}{\frac{1}{C_L} - \frac{1}{C_S}}$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

.3.2.3. Structure des décanteurs

En pratique, il n'y a pas de décanteur idéal: des tourbillons se produisent au sein du liquide, le vent peut créer des vagues à sa surface; des courants de convexion liés aux différences locales de température (ensoleillement) et de densité affectent le rendement de décantation. Il faut s'efforcer d'obtenir autant que possible une circulation laminaire et stable caractérisée par des valeurs appropriées du nombre de Reynolds défini par

$$Re^* = \frac{V\, d_h}{V}$$

Re*: Nombre de Reynolds (caractérisant l'écoulement du fluide).

V : Vitesse de circulation de l'eau $m.s^{-1}$.

d_h : Diamètre hydraulique équivalent m.

V : Viscosité cinématique de l'eau $m^2.s^{-1}$

$$\text{avec } d_h = 4\ \frac{\text{Surface mouillée}}{\text{Périmètre mouillé}}$$

Remarque: le rayon hydraulique d'un conduit est défini par

$$r_h = \frac{\text{Surface mouillée}}{\text{Périmètre mouillé}}$$

Dans le cas d'une conduite circulaire pleine, le diamètre hydraulique s'identifie au diamètre du conduit. Les valeurs numériques ,du nombre de Reynolds dépendent du choix de r_h ou de d_h dans la définition. En pratique, le régime est considéré comme laminaire si Re* < 800 (avec d_h).

Par ailleurs, **le nombre de Froude** permet d'aprécier la stabilité d'un processus circulatoire lorsque l'écoulement est influencé principalement par la force de gravité et les forces d'inertie.

$$Fr = \frac{V^2}{g d_h}$$

Figure 46. Courbes de flux massique

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Plus la circulation est stable, plus la distribution des vitesses est uniforme sur toute la section du bassin. Des circulations stables se caractérisent par des nombres de Froude élevés.

En pratique, on peut définir les rapports H/L ou H/R, H étant la hauteur mouillée des décantateurs rectangulaires de longueur L ou circulaires de rayon R. En se fixant un temps de séjour de deux heures, Schmidt-Bregas donne

- décanteurs rectangulaires à flux horizontal

$$\frac{1}{35} < \frac{H}{L} < \frac{1}{20}$$

- décanteurs circulaires:

$$\frac{1}{8} < \frac{H}{R} < \frac{1}{6}$$

La forme de l'ouvrage, l'organisation du dispositif d'alimentation en eau brute et de celui de collecte d'eau traitée ainsi que le mode d'évacuation des boues ont aussi une grande influence sur le rendement hydraulique du décanteur.

Dans le cas d'eaux ou de liqueurs très chargées en MES les "courants de densité" peuvent provoquer une distribution inappropriée des vitesses. Tel est le cas par exemple des décantateurs rectangulaires conventionnels trop longs utilisés pour la clarification des liqueurs de boues activées (figure 47).

Les courants de convection dus aux effets de température (ensoleillement, eau chaude) et les perturbations liées aux variations de salinité (eaux d'estuaire, ERI) sont à prendre en compte dans le dimensionnement (ainsi que l'exploitation) du décanteur

.

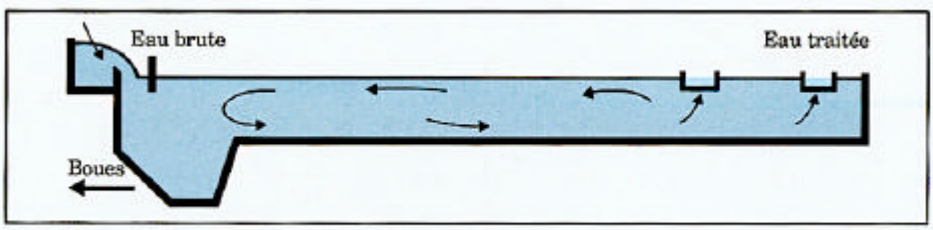


Figure 47. Courants de densité dans un décanteur longitudinal.

3.3. DÉCANTATION LAMELLAIRE

3.3.1. Principe

Pour les décanteurs à flux horizontal, la seule grandeur fondamentale est la surface horizontale S_H de l'ouvrage (§ 3.1.1.).

La capture d'une particule grenue s'effectue si sa vitesse de décantation est supérieure à la vitesse de Hazen V_H.

$$V_H = \frac{Q}{S_H}$$

La rétention d'une particule est donc théoriquement indépendante de la hauteur de l'ouvrage. Ainsi, en décantation horizontale, il est possible théoriquement, à performances égales, de traiter

- un débit nQ, dans le mémé ouvrage, en superposant n étages de hauteur élémentaire H/n (figure 48 a et b),

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- un même débit Q en superposant n étages de hauteur élémentaire H/n et de longueur L/n (fig. 48 a et c).

Dans la pratique, la superposition de décanteurs horizontaux non râclés pose le problème d'une bonne évacuation des boues et conduit ainsi à une baisse des performances.

3.3.2. Généralisation

La décantation lamellaire consiste à multiplier dans un même ouvrage les surfaces de séparation eau-boue. Ainsi le positionnement de faisceaux lamellaires (tubes ou plaques parallèles) dans la zone de décantation crée un grand nombre de cellules élémentaires de séparation. Afin d'assurer l'évacuation des boues, il est nécessaire d'incliner les lamelles d'un angle d par rapport à l'horizontale.

Par analogie avec la loi de Hazen, et en première approximation, la vitesse limite de décantation u_1 dans un élément est

$$u_l = \frac{Q}{n.S_L \cos \delta}$$

SL : surface élémentaire de chaque élément, n : nombre de lamelles.

Trois types de décantation lamellaire existent (figure 49)

- **contre-courant** (boue et eau circulent en sens inverse)

$$u_l = \frac{Q}{n.l.\ (L \cos \delta + e \sin \delta)}$$

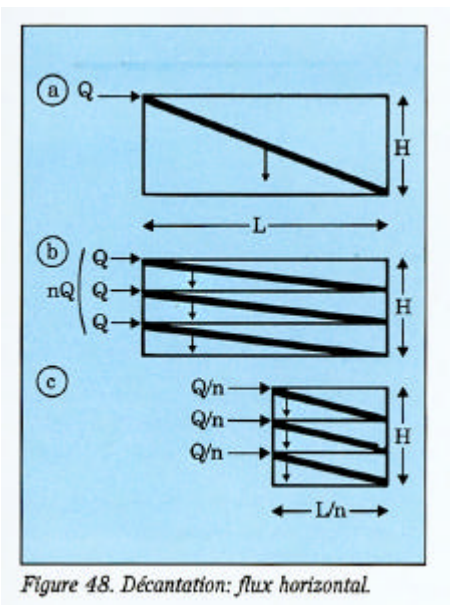


Figure 48. Décantation: flux horizontal.

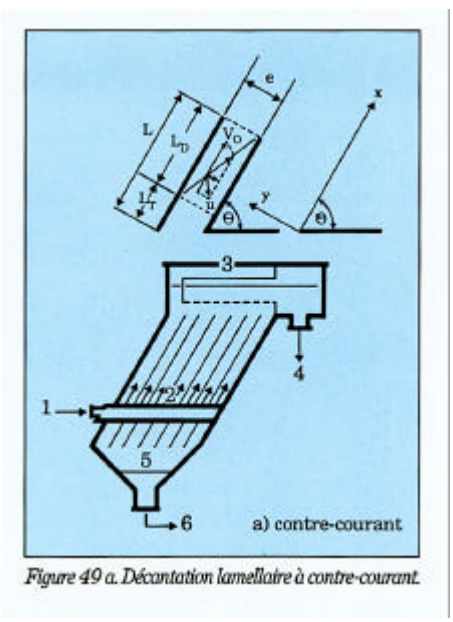


Figure 49 a. Décantation lamellaire à contre-courant.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

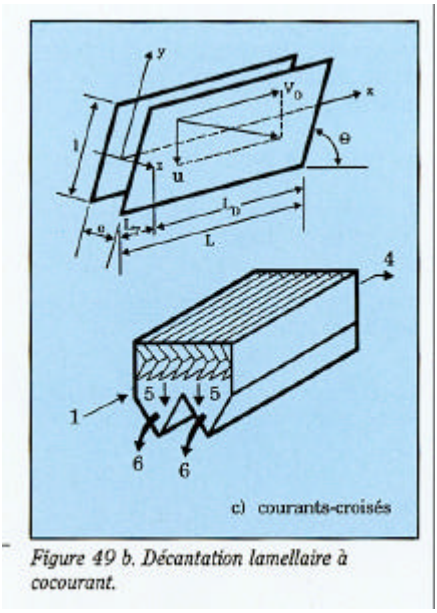


Figure 49 b. Décantation lamellaire à cocourant.

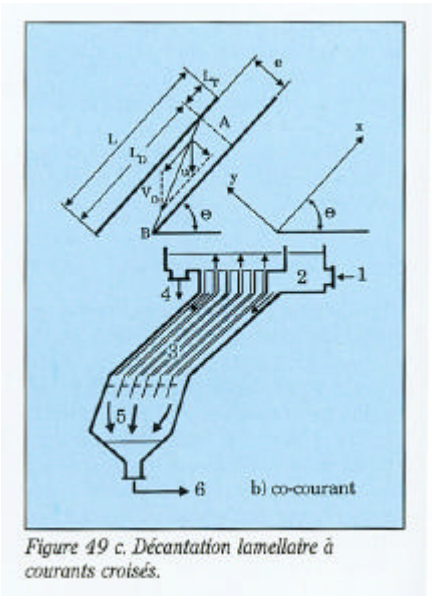


Figure 49 c. Décantation lamellaire à courants croisés.

1 - Entrée de l'eau floculée.
2 - Zone de distribution.
3 - Récupération de l'eau décantée.
4 - Sortie de l'éau décantée.
5 - Fosse à boue.
6 - Évacuation des boues

Figure 49. Les trois types de décantation lamellaire

- **cocourant** (boue et eau circulent de haut en bas)

$$u_1 = \frac{Q}{n.l.\ (L \cos \delta - e \sin \delta)}$$

- **courants croisés** (boue et eau circulent perpendiculairement)

$$u_1 = \frac{Q}{n.l.\ L \cos \delta}$$

avec L : longueur de la lamelle
l : largeur de la lamelle
e : écartement entre deux lamelles (distance orthogonale).
} $S = L.l$

Ces formules ne tiennent pas compte des contraintes hydrauliques, ni de celles liées au départ et à l'évacuation des matières décantées.

3.3.3. Étude théorique

- **Répartition non uniforme des vitesse**s Soit un système de faisceaux lamellaires disposés dans un décanteur. La répartition des vitesses en régime laminaire est parabolique, ce qui dans le système de coordonnées choisi conduit aux formules suivantes pour un système à contre-courant, (figure 50).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

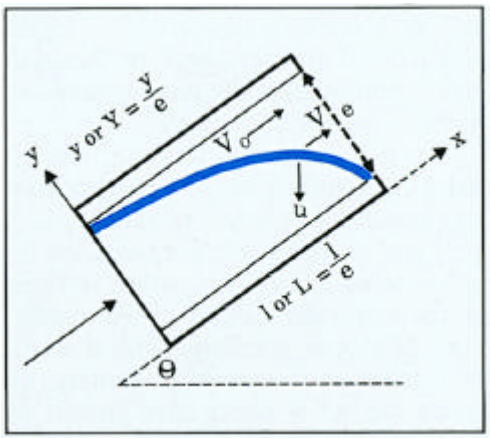


Figure 50. Trajectoire d'une particule Capturée

$$\frac{v}{v_o} = A\,(Y - Y^2)$$

$$S_c = \frac{u_l}{v_o}\,(\sin\theta + L\cos\theta)$$

avec v : vitesse d'écoulement du fluide en un point donné.

v_o :vitesse moyenne du fluide dans la direction Ox.

u_o : vitesse ascensionnelle moyenne (composante verticale de v_o soit v_o sin Ø).

u_1 : vitesse minimale de décantation que doit avoir une particule pour être retenue dans le système.

L : rapport 1/e,1 étant la longueur de l'élément dans le sens du courant appelée aussi longueur réduite.

Y : y/e ordonnée de la particule dans la direction Y, appelée aussi ordonnée réduite.

e : distance orthogonale entre deux faisceaux.

A et S_c: paramètres dépendant du type de plaques ou de tubes.

	A	S_c
Tubes circulaires	8	4/3
Plaques parallèles	6	1
Tubes carrés	Non explicite	11/8
Tubes hexagonaux	Non explicite	4/3

La longueur l_D de décantation nécessaire pour séparer des particules ayant une vitesse de sédimentation u_1 est :

$$l_D = e\left(\frac{S_c}{\cos\theta.\sin\theta} \times \frac{u_o}{u_l} - \operatorname{tg}\theta\right)$$

- **Établissement du régime laminaire**

La formule précédente considère que le régime est laminaire dès le bas des lamelles. Dans la pratique, une longueur de transition l_T doit être rajoutée, telle que le fluide passe d'un régime turbulent à un régime laminaire. l_T est défini par

l_T : ad_h Re*,

a : constante (0,028 d'après Schiller),

d_h : diamètre hydraulique,

Re*: nombre de Reynolds.

La longueur totale nécessaire est donc :

$$l = e\left(\frac{S_c}{\cos\theta.\sin\theta} \times \frac{u_o}{u_l} - \operatorname{tg}\theta + \frac{0{,}028\,d_h^2}{v\ .\sin\theta} \cdot \frac{u_o}{3600}\right)$$

-l,e en m,

- u_o, u_1 en $m.h^{-1}$,

-v en $m^2.s^{-1}$

Cette formule permet inversement de connaître le pouvoir de coupure à un régime donné d'un décanteur existant.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3.4. Application pratique

- **Choix du type de décantation lamellaire**

La décantation à contre-courant permet l'organisation hydraulique la plus simple et la plus fiable. Par contre, la décantation à cocourant se heurte à de grandes difficultés dans la reprise de l'eau décantée. Dans la décantation à flux croisés, l'équirépartition des flux hydrauliques est délicate.

- **Choix du type de faisceaux lamellaires** De nombreux modèles sont disponibles plaques ondulées, tubes ronds, tubes carrés, chevrons, modules hexagonaux.

Afin de comparer les divers faisceaux lamellaires entre eux, il est intéressant de considérer le paramètre approché u, défini en page 167, soit:

$$u_l = \frac{Q}{n.S_L.\cos\delta} = \frac{u_o.S_H}{n.S_L.\cos\delta}$$

$$\text{soit } \frac{u_l}{u_o} = \frac{S_H}{n.S_L.\cos\delta}$$

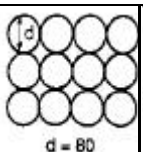
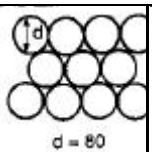
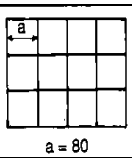
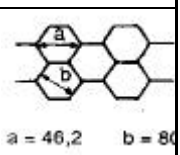
Ce rapport dépend du type de faisceau considéré. Ainsi, à diamètre hydraulique équivalent, pour des faisceaux de longueur 1,5 m inclinés à 60°, les **modules hexagonaux** ont la surface projetée la plus importante (voir tableau ci-dessous).

Les faisceaux à plaques parallèles peuvent également développer des surfaces importantes tout en gardant des hauteurs raisonnables, mais cela n'est possible qu'au prix d'une forte réduction des espaces entre plaques qui compromet sérieusement la fiabilité de l'installation. Par ailleurs, la mise en place des plaques est délicate; elle nécessite la pose de supports et d'entretoises qui sont souvent des facteurs perturbant l'hydraulique et favorisant l'accrochage des boues.

3.3.5. Conclusion

L'efficacité hydraulique des modules hexagonaux est supérieure à celle des autres faisceaux tubulaires et des plaques parallèles. Ces modules minimisent considérablement les risques de colmatage tout en offrant une surface développée importante.

Degrémont utilise de tels modules avec des diamètres hydrauliques de 80 et 50 mm suivant les applications.

Type de faisceau lamellaire	**Tubes circulaires alignés**	**Tubes circulaires en quinconce**	**Tubes carrés**	**Modules hexagonaux**
Diamètre hydraulique équivalent mm	80			
Forme				
$\frac{u_l}{u_o}$	$\frac{1}{6,4}$	$\frac{1}{7,4}$	$\frac{1}{8,1}$	$\frac{1}{10,8}$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. FLOTTATION

4.1. FLOTTABILITÉ ET VITESSE ASCENSIONNELLE

4.1.1. Généralités

Par opposition à la décantation, la flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique est inférieure à celle du liquide qui les contient.

- Si cette différence de masse volumique est naturellement suffisante pour une séparation, cette flottation est dite **naturelle**.
- La flottation est dite **assistée** si elle met en oeuvre des moyens extérieurs pour améliorer la séparation de particules naturellement flottables.
- La flottation est dite **provoquée** lorsque la masse volumique de la particule, à l'origine supérieure à celle du liquide, est artificiellement réduite. Elle tire parti de l'aptitude qu'ont certaines particules solides (ou liquides) à s'unir à des bulles de gaz (l'air en général) pour former des attelages "particule-gaz" moins denses que le liquide dont elles constituent la phase dispersée. Le phénomène mis en oeuvre est donc un phénomène triphasique (gaz-liquide-solide en général) qui va dépendre des caractéristiques physico-chimiques des trois phases et en particulier de leurs **interfaces.**

Dans la mise en oeuvre industrielle, il y a toujours un certain recouvrement entre les différents procédés.

4.1.2. Dimension et vitesse des bulles

- **La vitesse ascensionnelle** d'une bulle de gaz dans l'eau en régime laminaire est donnée par l'équation de Stokes (cf page 159).

$$V = \frac{g}{18\eta} \cdot (\varrho_l - \varrho_g) \cdot d^2$$

dans laquelle
d = diamètre de la bulle,
Q_g = masse volumique du gaz,
Q_l = masse volumique du liquide,
? = viscosité dynamique. .

- **Terminologie**

Il est d'usage dans le domaine du traitement de l'eau, de réserver le terme de flottation (au sens strict) à la flottation provoquée utilisant des bulles d'air très fines ou "microbulles" de 40 à 70 microns de diamètre, semblables à celles présentes dans "l'eau blanche" débitée par le robinet d'un réseau d'eau sous forte pression. Ce procédé est la **flottation à l'air dissous** (FAD ou DAF).

Au contraire, en minéralurgie, on donne le nom de **flottation mécanique** à l'utilisation d'air dispersé avec production de bulles de 0,2 à 2 mm de diamètre; les applications sont aussi très différentes.

La figure 51 indique la variation de la vitesse ascensionnelle de bulles d'air en fonction de leur diamètre. Les bulles de 50 microns ont une vitesse ascensionnelle de l'ordre de 6 $m.h^{-1}$, alors que des bulles de quelques millimètres de diamètre ont des vitesses de l'ordre de 100 fois supérieures.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

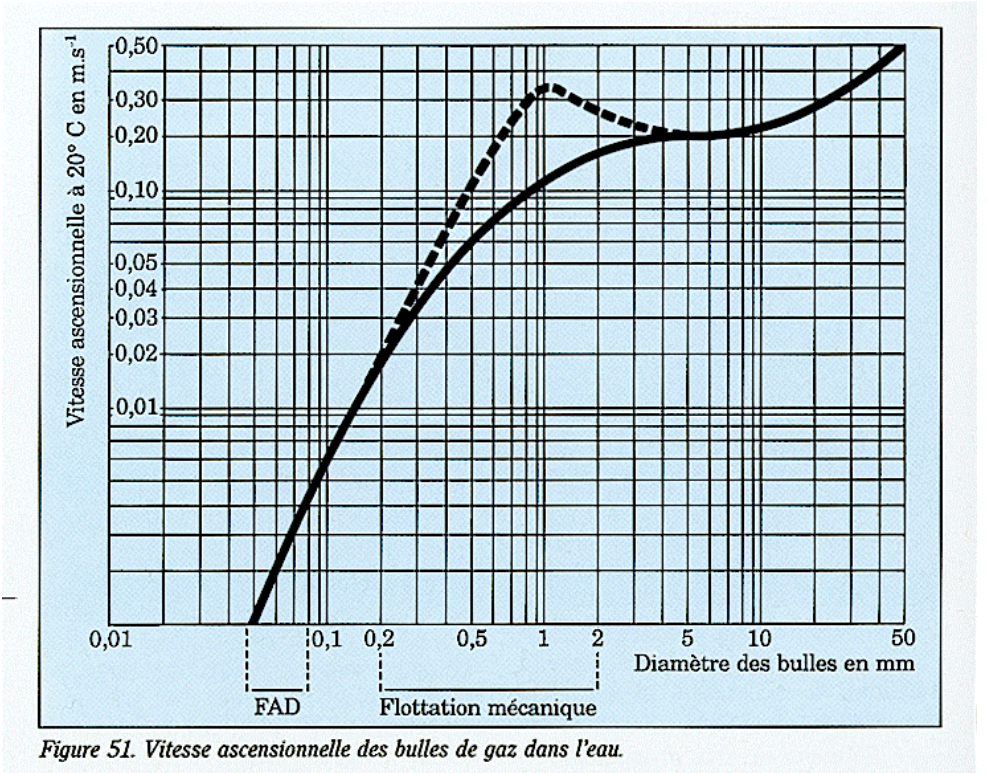


Figure 51. Vitesse ascensionnelle des bulles de gaz dans l'eau.

4.1.3. Attelage particule-bulle

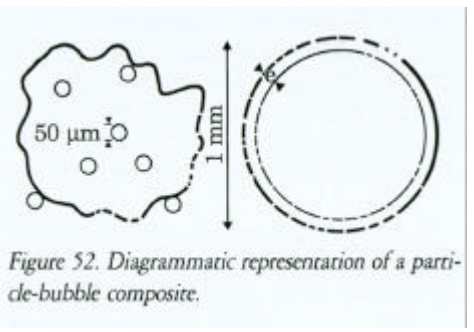


Figure 52. Diagrammatic representation of a particle-bubble composite.

4.1.3.1. Vitesse ascensionnelle

L'équation de Stokes est toujours valable en notant que :

d est le diamètre de "l'attelage" particule-bulle, Q_s est remplacé par $\underline{Q}_s$ masse volumique de l'attelage particule bulle.

Le facteur de forme ou de sphéricité de l'ensemble "particule bulle de gaz" doit être aussi pris en compte.

L'influence favorable de la taille (assimilée au diamètre d'une sphère) de l'ensemble "particule bulle de gaz" ne doit pas faire oublier que, dans le cas de la flottation de particules plus lourdes que le liquide, la surface spécifique, c'est-à-dire le rapport

$$\frac{\text{Surface}}{\text{Volume}} \text{ ou } \frac{\text{Surface}}{\text{Masse}}$$

diminue quand le diamètre augmente. Il en résulte, pour une même quantité d'air

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

fixé par unité de surface, une réduction du facteur: $(Q_1 - Q_S)$. Une optimisation est donc nécessaire.

4.1.3.2. Considérations générales sur la taille des bulles

Pour la **séparation des flocs**, l'utilisation de microbulles est nécessaire pour les raisons suivantes

- l'emploi de bulles de quelques millimètres de diamètre conduirait à un débit d'air beaucoup plus important que celui de microbulles, si l'on désire une bonne **répartition** des bulles sur toute la section de l'appareil. Parallèlement, cette augmentation du débit d'air engendrerait des courants turbulents perturbateurs,
- l'augmentation de la concentration en bulles favorise la probabilité de recontre entre particules solides et bulles. Par ailleurs, la faible vitesse ascensionnelle des bulles par rapport à la masse fluide permet leur adhésion sur les particules fragiles que sont les flocs. Cet accrochage implique que leur diamètre soit bien inférieur à celui des matières ou du floc en suspension.

Pour **la séparation des particules plus volumineuses que les flocs et plus légères que l'eau**, des tailles de bulles supérieures sont utilisables. C'est le cas de la séparation de graisses.

4.1.3.3. Volume minimal de gaz pour assurer la flottation

Le volume minimal V_g de gaz, de masse volumique Q_g, nécessaire pour assurer la flottation d'une particule de masse S et de masse volumique Q_s, dans un liquide de masse volumique Q_1, est donné par la relation

$$\frac{V_g}{S} = \frac{\varrho_s - \varrho_g}{\varrho_1 - \varrho_g} \times \frac{1}{\varrho_g}$$

4.1.3.4. Importance de la qualité du floc

- **Floc physico-chimique:** la flottation est souvent combinée à une floculation préalable: la forme floculée des particules est une condition sine qua non de l'efficacité du processus d'accrochage flocbulle. L'adjonction d'un adjuvant de floculation (cf. pages 141 et 142) permet, si nécessaire, de grossir le floc et d'augmenter ainsi la surface des particules. Il s'en suit une amélioration de l'accrochage des bulles et une augmentation de la vitesse ascensionnelle des attelages.
- **Floc biologique:** la qualité de la biofloculation influe de façon certaine sur les performances de la flottation (hydratation, tensio-activité, indice de Mohlman, taille du floc ...). En particulier, les boues activées foisonnantes sont difficiles à flotter.

4.2. FLOTTATION NATURELLE ET FLOTTATION ASSISTÉE

4.2.1. Flottation naturelle

La flottation naturelle est couramment employée dans tous les prédéshuilages. Cette flottation (biphasique) peut être précédée d'une coalescence (permettant l'adhésion des microgouttelettes entre elles) de façon à atteindre une taille minimale favorable à la séparation.

La figure 53 indique les vitesses ascensionnelles de gouttelettes d'hydrocarbures de différentes dimensions, valeurs qui servent de base au calcul des déshuileurs statiques.

La flottation naturelle peut se produire à la suite d'un dégagement gazeux dû à une fermentation; c'est le cas du "chapeau"

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

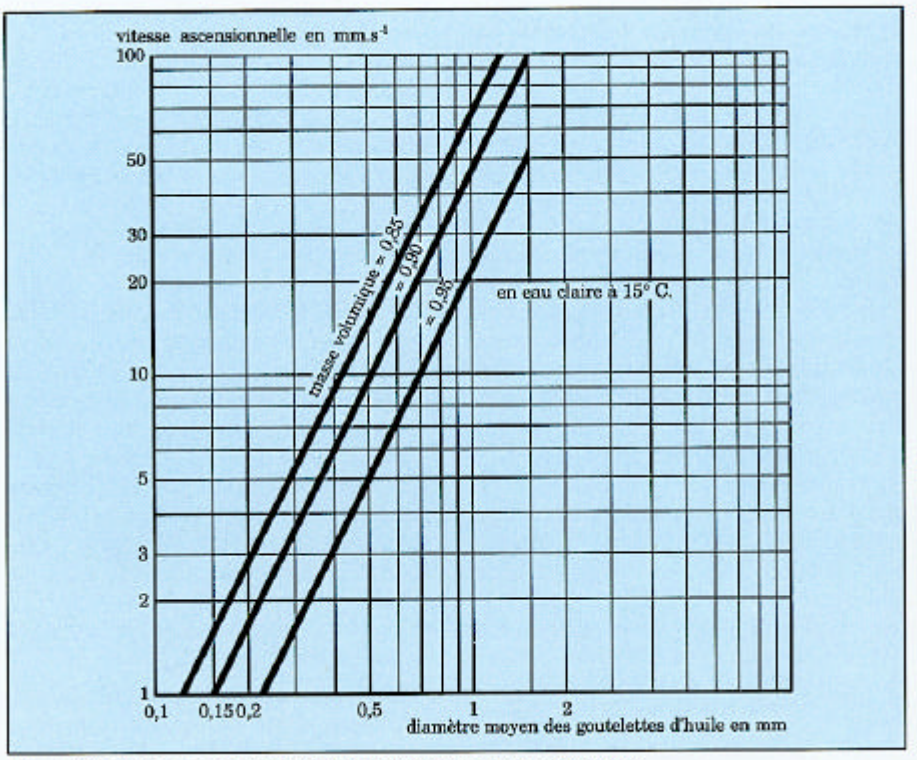


Figure 53. Vitesse ascensionnelle des gouttelettes d'huile dans l'eau.

de digesteurs qui peut présenter des concentrations en MS de 20 à 40% alors que sa masse volumique n'est que de 0,7 ou 0,8 $kg.l^{-1}$.

4.2.2. Flottation assistée

Il s'agit d'une flottation naturelle favorisée par l'insufflation de bulles d'air au sein de la masse liquide. Ce procédé concerne en particulier la séparation de graisses (particules solides) dispersées dans un liquide chargé (eau résiduaire). L'ouvrage comporte généralement deux zones, l'une de brassage et d'émulsion, l'autre, plus calme, de flottation proprement dite.

Pour un dégraissage sommaire, l'air estinsufflé par des diffuseurs à moyennes bulles (2 à 4 mm) provoquant une turbulence de façon à séparer les particules lourdes, minérales ou organiques, agglomérées avec les graisses (figure 54).

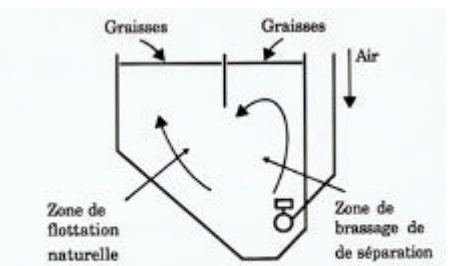


Figure 54. Principe du dégraissage par flottation assistée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Pour un dégraissage plus poussé, l'air est, diffusé en fines bulles (0,5 à 1 mm) par un aérateur mécanique immergé, le mobile hydraulique de l'appareil assurant le bras sage et la séparation des graisses l'effet d'air-lift des bulles d'air entraînant. les particules en surface et favorisant ainsi leur accumulation.

4.3. FLOTTATION MÉCANIQUE ET MOUSSAGE

Ce procédé s'applique dans des créneaux très différents de celui de la flottation à l'air dissous : taille et densité des particules solides, taille des bulles mises en oeuvre, conditions de mélange. Des réactifs particuliers sont utilisés pour modifier les tensions de surface.

Cette dispersion mécanique de bulles d'air de 0,2 à 2 mm de diamètre est surtout utilisée pour la séparation et la concentration différentielle des pulpes de **minerais**. Le minerai broyé, à une taille généralement inférieure à 0,2 mm, est mis en suspension dans l'eau à laquelle peuvent être ajoutés l'agent collecteur, un agent activateur ou un agent dépresseur. La réalisation nécessite un grand nombre de cellules en série. Chaque cellule est équipée d'un ensemble stator-rotor mettant en oeuvre des énergies considérables auxquelles ne résisterait pas un flot d'hydroxyde.

En traitement **d'eaux huileuses** (eau de production pétrolière), la séparation des huiles par flottation mécanique est appelée moussage. Elle est obtenue par l'addition de coagulant organique ou d'agent désémulsifiant. Les flottateurs sont alors constitués de trois ou quatre cellules en série.

Le moussage par simple insufflation d'air peut également être utilisé pour la séparation d'agents tensio-actifs.

4.4 FLOTTATION PAR MICROBULLES

Comme on l'a vu page 171, il s'agit normalement de la flottation à l'air dissous (figure 55).

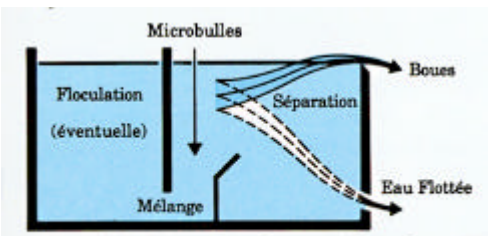


Figure 55. Schéma d'une flottation à l'air dissous.

4.4.1. Production des microbulles

La pressurisation constitue la technique de production de microbulles la plus répandue. Les bulles sont obtenues par détente d'une solution enrichie en air dssous sous une pression de quelques bars. La nature de l'organe de détente a une influence déterminante sur la qualité des bulles produites. La courbe de la figure 56 indique la concentration en air d'une eau saturée en air pour différentes pressions à 20 °C. On utilise comme liquide pressurisé soit l'eau brute (pressurisation directe), soit l'eau traitée recyclée (pressurisation indirecte).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- Dans le .traitement de clarification d'eau de surface ou d'ERI, la pressurisation est indirecte; le débit d'eau pressurisée est une fraction du débit nominal de l'installation; il représente 10 à 5 0 % du débit à traiter avec des pressions de l'ordre de 3 à 6 bars. On réalise une dissolution d'air à un taux d'environ 70 % de la saturation à la pression considérée. La consommation en air comprimé varie ainsi entre 15 et 501 normaux d'air par m^3 d'eau traitée.

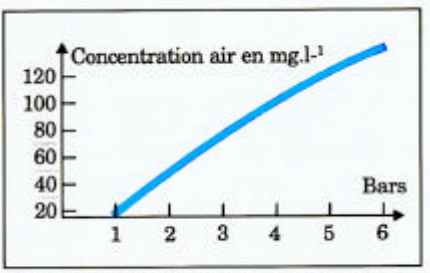


Figure 56. Solubilité de l'air dans l'eau (20 °C).

- Dans le cas de l'épaississement de boue (station d'eau potable ou d'eau résiduaire), la pressurisation se fait de façon directe ou indirecte et la consommation d'air est beaucoup plus élevée.

L'électro-flottation peut aussi réaliser la production de bulles (H_2 et O_2) par électrolyse de l'eau au moyen d'électrodes appropriées. Les anodes sont très sensibles à la corrosion et les cathodes à (entartrage par décarbonatation. Quand la protection des anodes requiert (emploi de titane protégé, il n'est pas possible d'inverser périodiquement les électrodes en vue de l'auto-nettoyage: Un traitement chimique préalable de l'eau ou un détartrage périodique des cathodes doivent alors être prévus. Les densités de courant pratiquées sont de (ordre de 80 à 90 ampères-heure par m^2 de surface de flottateur. La production de gaz est de 50 à 60 litres par heure et par m^2 de surface. Les vitesses ascensionnelles possibles sont plus faibles qu'avec la flottation à l'air dissous par suite des caractéristiques des bulles et de leur système de génération.

4.4.2. Domaines d'utilisation

Les applications de la FAD dans le domaine du traitement des eaux sont multiples

- séparation de matières floculées en clarification d'eau de surface (pour les eaux peu chargées en MES),
- séparation et récupération de fibres des eaux de papeterie,
- séparation d'huiles floculées ou non sur des eaux résiduaires de raffinerie, d'aéroports, de métallurgie,
- séparation d'hydroxydes métalliques ou de pigments en traitement d'ERI,
- épaississement de boues provenant du traitement biologique d'eaux résiduaires ou de traitement de clarification d'eau potable (de PULSATOR par exemple).
- clarification de liqueur de boues activées.

La vitesse de séparation ou vitesse "descensionnelle" de l'eau adoptée dans les flottateurs varie suivant la nature des suspensions à traiter et également suivant le mode de génération et de distribution des microbulles.

Pour un appareil donné, la vitesse descensionnelle acceptable (ou le flux massique spécifique en cas d'épaississement) et la concentration de la boue flottée sont fortement influencées par la valeur du rapport

$$\frac{\text{quantité d'air dissous}}{\text{quantité de matières à flotter}}$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Généralement, plus ce rapport est grand, plus importante est la force ascensionnelle communiquée aux particules et plus la vitesse descensionnelle peut être élevée. Plus la densité apparente de la boue est faible, plus sa concentration en matières sèches est importante.

Sur des eaux résiduaires, il n'est, en général, pas possible de flotter toutes les matières en suspension. Inévitablement, une partie de celles-ci, très lourde, plus ou moins importante, s'accumule à la longue sur le radier de l'appareil. Aussi les flottateurs sont-ils toujours équipés d'un système d'élimination des boues de fond (fond fortement conique ou racleurs de fond).

Les conditions d'application en traitement des eaux des différents procédés de flottation sont résumées dans le tableau ci-après.

Procédé	**Débit air utilisé** N l.m^{-3} eau	**Taille des Bulles**	**Puissance absorbée traitée** Wh.m^{-3}	**Temps théorique de séjour** mn	**Charge hydraulique superficielle** m.h^{-1}
Flottation assistée (dégraissage)	100 à 400	2 à 5 mm	5 à 10	5 à 15	10 à 30
Flottation mécanique (moussage)	10000	0,2 - 2 mm	60 - 120	4 à 16	
Flottation à air dissous (clarificat.)	15 à 50	45 - 40 µM	40 à 80	20 à 40 (hors flocul.)	3 - 10

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. FILTRATION

5.1. ÉQUATIONS DE BASE

La filtration est un procédé de séparation qui utilise le passage d'un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les particules solides et laisse passer le liquide (filtrat).

5.1.1. Loi générale

La filtration étant l'écoulement d'un liquide dans un milieu poreux est régie, pour les vitesses usuellement appliquées en traitement d'eau, par la loi de Darcy

$$V = \frac{K}{\eta}\frac{\Delta P}{\Delta H} = \frac{1}{R\eta}\frac{\Delta P}{\Delta H}$$

où V : vitesse de filtration,

K : perméabilité de la couche filtrante,

?P : perte de charge à travers la couche filtrante,

?H: hauteur de couche considérée,

? : viscosité dynamique de l'eau,

R : résistance à la filtration de la couche filtrante.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La perte de charge ?P est proportionnelle à la vitesse de filtration V, à la viscosité dynamique de l'eau, à la hauteur de couche et inversement proportionnelle à la perméabilité du milieu.

5.1.2. Filtration d'un liquide chargé avec formation d'un gâteau

On considère ici la filtration sur support d'un liquide boueux avec formation d'un gâteau d'épaisseur croissante (figure 57).

Dans l'expression de la loi de Darcy on admet que R comprend deux résistances en série, d'une part la résistance Rg du gâteau et d'autre part, la résistance initiale R_m de la membrane

$$R = R_g + R_m$$

$$\text{avec } R_g = r\frac{M}{S} = r\frac{Wv}{S}$$

M : masse totale du gâteau déposée,
W : masse de MES déposée par unité de volume du filtrat,
v :volume du filtrat au bout d'un temps t,
S : surface de filtration,
r : résistance spécifique à la filtration du gâteau sous la pression P,

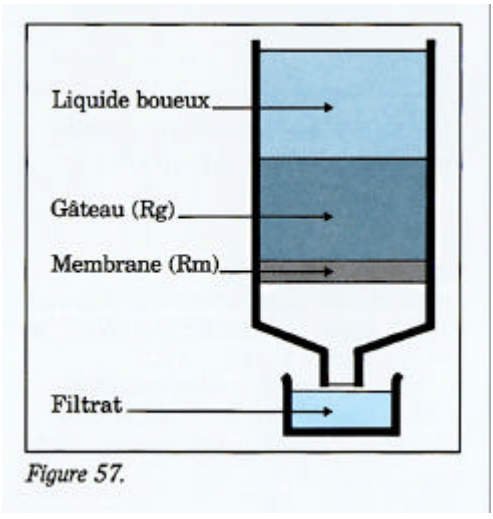


Figure 57.

$$\text{d'où } V = \frac{1}{S}\frac{dv}{dt} = \frac{P}{\eta\left(r\frac{Wv}{S} + R_m\right)}$$

dont l'intégration conduit à une équation

$$\text{du type } t = av^2 + bv \text{ ou } \frac{t}{v} = av + b$$

$$\text{avec } a = \frac{\eta r W}{2\,PS^2} \text{ et } b = \frac{R_m}{PS}$$

La représentation graphique de cette équation est une droite qui permet de caractériser r par la pente a = tg– (figure 58).

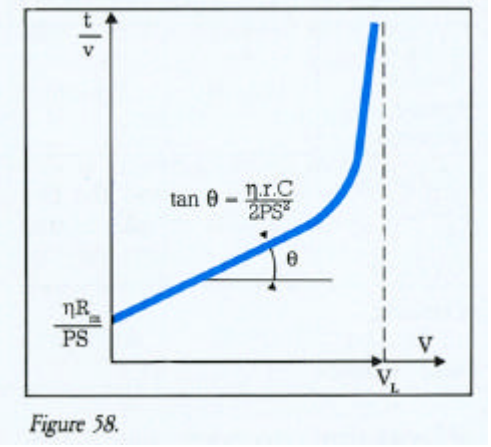


Figure 58.

Nota: cette intégration n'est correcte que si r reste constante pendant toute la filtration et ceci n'est totalement vrai que pour les boues incompressibles.

Si l'on prolonge pendant un temps assez long la filtration d'un volume déterminé de gâteau, on arrive tout d'abord à un point de cassure de la courbe au-delà duquel la siccité augmente très lentement jusqu'à la siccité limite du gâteau. La valeur de r augmente avec la pression suivant une loi de la forme $r = r_o + r'p^s$ dans laquelle r_o et r' sont respectivement la résistance spécifique limite pour P = 0 et la résistance spécifique sous pression de un bar ; **le facteur de compressibilité de la boue s** est un nombre sans dimension. Le **coefficient de filtration r** ou **résistance spécifique** s'exprime en $m.kg^{-1}$. La résistance $r_{0'5}$, obtenue sous une pression de 49 kPa (0,5 bar), est utilisée généralement dans la comparaison de diverses boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.2. GÉNÉRALITÉS

On distingue trois grandes catégories de processus de filtration selon le mode de mise en oeuvre
- la filtration sur support,
- la filtration sur lit granulaire,
- la filtration avec gâteau.

La **filtration sur membrane**, développement de la filtration sur support, est étudiée au sous-chapitre 9. La **filtration des boues**, qui inclut plusieurs techniques de filtration avec formation de gâteau, l'est au chapitre 19, § 2.

5.2.1. Mécanismes de filtration

Suivant les caractéristiques des particules à retenir et du matériau filtrant mis en oeuvre, peuvent intervenir l'un ou plusieurs des trois mécanismes principaux suivants: capture, fixation et détachement.

5.2.1.1. Mécanismes de capture

Ils sont essentiellement de deux natures

- **Tamisage mécanique**: il s'agit de la rétention des particules plus grosses que la maille du filtre ou que celle des éléments déjà déposés formant eux-mêmes matériau filtrant. Ce phénomène intervient d'autant plus que la maille du matériau filtrant est plus fine: il est de peu d'importance pour un lit filtrant composé de matériau relativement grossier, par contre il est prépondérant dans une filtration sur support mince: tamis, manchon filtrant, etc.
- **Dépôt sur le matériau filtrant:** la particule en suspension suit dans le liquide une ligne de courant; sa taille, comparée à celle des pores, pourrait lui permettre de traverser le matériau filtrant sans être arrêtée. Différents phénomènes entraînent cependant un changement de trajectoire et le contact avec le matériau.

On distingue en particulier
- l'interception directe par frottement,
- la diffusion par mouvement brownien, - l'inertie de la particule,
- la décantation: par leur poids les particules peuvent se déposer sur le matériau filtrant quel que soit le sens de filtration.

Ces différents mécanismes de capture interviennent principalement dans la filtration en profondeur.

5.2.1.2. Mécanismes de fixation

La fixation des particules à la surface du matériau filtrant est favorisée par une faible vitesse d'écoulement. Elle est due à des forces d'origine physique (coincement, cohésion...), et à des forces d'adsorption, principalement les forces de Van der Waals.

5.2.1.3. Mécanismes de détachement

Sous l'action des mécanismes précédents, il se produit une diminution de l'espace entre les parois du matériau recouvertes de particules déjà déposées. Il y a alors augmentation de la vitesse d'écoulement. Les dépôts déjà retenus peuvent se détacher partiellement et être entraînés plus avant dans le matériau filtrant ou même dans le filtrat.

Les particules solides contenues dans un liquide et les particules colloïdales plus ou moins floculées n'ont pas les mêmes caractéristiques et ne réagissent pas dans la même proportion aux divers mécanismes précédents. La filtration directe d'un liquide dont les matières en suspension conservent leur état et leur charge électrique est donc très différente de la filtration d'un liquide coagulé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.2.2. Colmatage et lavage du matériau filtrant

On appelle colmatage l'obstruction progressive des interstices du matériau filtrant. Le colmatage provoque une augmentation de la perte de charge.

Si l'on fonctionne à pression d'alimentation constante, le débit du filtrat baisse. Si l'on désire maintenir ce débit constant, il faut augmenter la pression initiale au fur et à mesure du colmatage.

La vitesse de colmatage dépend
- des matières à retenir: elle est d'autant plus grande que le liquide est plus chargés en MES, que ces matières ont une plus grande cohésion et qu'elles sont susceptibles, elles-mêmes, de prolifération (algues, bactéries),
- de la vitesse de filtration,
- des caractéristiques de l'élément filtrant: dimension des pores, homogénéité, rugosité, forme du matériau.

Le filtre est colmaté lorsqu'il a atteint la perte de charge maximale prévue par construction. Il importe de le ramener à son état initial par un lavage efficace et économique dont le mode est lié au type de filtre et à la nature des éléments retenus.

5.2.3. Choix du mode de filtration

Le choix entre les divers types de filtration sur support et la filtration sur lit filtrant dépend de plusieurs critères
- caractéristiques du liquide à filtrer, de ses impuretés et de leur évolution dans le temps,
- qualité du filtrat à obtenir et tolérances admises,
- qualité de l'agglomérat des matières retenues lorsque le but est de les récupérer,
- conditions d'installation,
- possibilités et moyens disponibles pour le lavage.

La possibilité d'un lavage aisé, efficace et économique est aussi importante dans le choix du filtre que l'obtention de la meilleure qualité de filtration, étant donné que cette dernière ne se conserve dans le temps que si le lavage permet de maintenir toujours intact le matériau filtrant.

5.3. FILTRATION SUR SUPPORT

On distingue :
- le tamisage, c'est-à-dire une filtration en surface et jusqu'à des seuils d'ouverture relativement gros (au-dessus de 30 microns environ),
- la filtration fine, dans laquelle la filtration sur support mince des plus grosses particules coexiste avec la filtration en épaisseur des plus fines.

Un aspect de la filtration en surface est à souligner: elle n'assure l'élimination des particules de taille supérieure à ses pores que dans la mesure où **ces particules ne sont pas déformables.** Sous pression et avec de fortes pertes de charge, il pourra y avoir passage de particules plus grosses.

5.3.1. Tamisage et microtamisage

Il s'agit en fait, d'une filtration relativement grossière réalisée sur support mince constitué par un tissu métallique ou plastique ou des éléments filtrants à orifices réguliers. Suivant les ouvertures, on distingue le microtamisage et le macrotamisage, ce dernier recouvrant le domaine du dégrillage fin (cf. chapitre 9).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ouverture des mailles ou des orifices	25 - 150 µm	0,2 - 4 mm	2 - 6 mm
Technique Fonctionnement	Microtamisage Gravitaire ou sous pression	Macrotamisage Gravitaire	Dégrillage fin Gravitaire

Le "pouvoir de coupure" est défini par le vide de maille: le système élimine toutes les particules dont la taille est supérieure à la taille de la maille. Au fur et à mesure de son fonctionnement, les particules tamisées obstruent partiellement les mailles, et le filtre peut retenir des particules de taille inférieure à la taille du pouvoir de coupure.

En fonctionnement gravitaire, la perte de charge maximale prévue pour ces filtres est généralement faible, de l'ordre de quelques dizaines de centimètres: elle est due à la fragilité des toiles mises en oeuvre qui risquent de se déchirer sous l'effet des pressions appliquées en fonctionnement et/ou en lavage.

5.3.1.1. Microtamisage à surface libre

L'objet principal d'un microtamis est d'éliminer le plancton contenu dans les eaux de surface; il élimine simultanément les matières en suspension de grande taille et les débris végétaux ou animaux que l'eau contient Il peut aussi être utilisé après épuration biologique ou après lagunage pour éliminer les matières en suspension résiduelles.

Le rendement optimal est obtenu en maintenant une perte de charge globale sensiblement constante, résultant d'un colmatage partiel dû au dépôt des particules à retenir. L'efficacité d'un tel appareil demeure toujours limitée par plusieurs facteurs

- les toiles lavées ne comportent pas encore de dépôt efficace au début du cycle de filtration et, pendant ce temps, la filtration est limitée à la taille même de la maille,
- l'élimination du plancton n'est jamais que partielle. Celui-ci peut proliférer de nouveau, d'autant plus que la température s'élève,

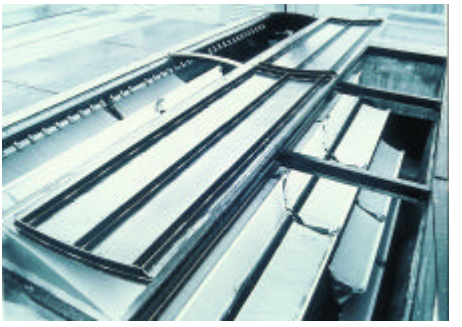


Figure 59. Microtamis à dièdres filtrants hors d'eau.

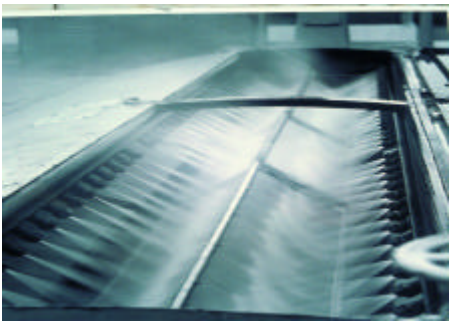


Figure 60. Microtamis à dièdres filtrants. Lavage des toiles.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- certains veufs de petites dimensions passent aisément à travers les toiles, se développent dans les bassins situés en aval où l'on peut assister à des développements de crustacés visibles à l'oeil nu,
- le risque de corrosion des toiles ou de leurs supports empêche de les faire travailler en continu sur une eau fortement préchlorée,
- les microtamis doivent être largement dimensionnés pour faire front aux pointes pluriannuelles de développement du plancton. Un sous-limensionnement risque de réduire de façon très importante le débit de la station pendant ces pointes ainsi que lors des crues alluvionnaires.

Plus le vide de maille est faible, plus la surface de toile doit être importante. Ainsi, pour une toile de 35 microns de vide de maille, la vitesse de filtration doit être au plus de 35 $m.h^{-1}$ calculée sur la surface totale du tamis, (50 $m.h^{-1}$ sur la surface réelle immergée).

La réduction du pouvoir colmatant de l'eau par microtamisage varie entre 50 et 80 % avec une moyenne de 65 % environ. A titre comparatif, un bon décanteur permet d'obtenir une réduction de 80 à 90 % sans préchloration, et de 95 à 99 % avec préchloration. L'emploi de microtamis doit être limité à des eaux peu chargées en MES. Il est sans action sur la couleur et sur les matières organiques dissoutes et n'élimine que la fraction la plus grossière des particules en suspension.

Quand on veut arrêter le plancton avec un bon rendement, la décantation précédée d'une préoxydation s'impose.

5.3.1.2. Microtamisage sous pression

Dans l'industrie, le tamisage des eaux peut être réalisé sous pression. Il est alors destiné à assurer :

- soit une **protection contre l'obstruction d'orifices** relativement gros (quelques mm) avec un seuil de tamisage de 0,15 à 2 mm. C'est le cas de circuits de refroidissement ouverts ou semi-ouverts,
- soit **l'élimination continue de matières fines.** Le seuil de tamisage peut être abaissé à 50-75 microns sinon plus bas et l'appareil s'intègre dans une chaîne de traitement. Ce peut être le cas de l'injection d'eau de mer en récupération secondaire de pétrole.

Ces filtres, principalement utilisés en filtration d'eau industrielle, sont appelés filtres rotatifs à régénération automatique ou, quelquefois, filtres mécaniques sous pression. Ils sont utilisables avec des pressions différentielles de 0,5 à 2 bars. La perte de charge initiale doit être faible (0,15 à 0,5 bar).

5.3.2. Filtration sur cartouches et bougies

5.3.2.1. But

En traitement d'eau, ces filtres sont utilisés pour résoudre l'un des problèmes suivants

- **Très haute qualité de filtrat,** à partir d'eaux très peu chargées et sans relargage du support

- condensats de chaudières HP, en démarrage ou en régime,
- alimentation de circuits d'eau ultrapure, - protection de membranes d'osmose inverse.

On recherche l'élimination de particules de plus en plus fines jusqu'à 0,5 microns (bactéries) et l'utilisation de supports consomma blés est souvent permise malgré leur coût

- **Protection de circuits hydrauliques** contre l'entraînement de particules grenues

- eau de mer en injection pour récupération secondaire,
- circuits de refroidissement ou d'usinage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

On doit assurer la prévention de toute perte de matériaux filtrants (fibres, résines, charbon actif, etc.), ou tout apport de particules par voie atmosphérique. Le niveau de filtration peut évoluer entre 10 à 200 microns. L'utilisation de supports régénérables devient envisageable.

5.3.2.2. Choix des médias

Il est effectué en fonction de l'efficacité recherchée et de paramètres liés à l'exploitation.

- **Critères d'efficacité des filtres**

- Le seuil de rétention nominal est donné par le constructeur pour un support et une suspension à traiter. Il correspond à la dimension des particules les plus fines retenues, sans donner un pourcentage d'élimination rigoureux.

- Le seuil de rétention "absolu" est le diamètre de la plus petite particule pour lequel l'indice a atteint la valeur que l'on recherche pour une application donnée.

$$\text{Cet indice } \beta = \frac{\text{Nombre de particules dans l'eau à filtrer}}{\text{Nombre de particules dans le filtrat}}$$

est mesuré par filtration d'une suspension témoin constituée de poudre de silice ACFTO pour les matières en suspension de taille supérieure à 1 µm, ou d'une suspension bactérienne en-dessous de 1 µm.

Le comptage est effectué au moyen d'un compteur électronique au laser. La figure 61 (ß en fonction du diamètre de particule) est un exemple de résultat obtenu sur un filtre d'essai. Selon l'industrie, l'indice ß recherché peut être de

$$\frac{5000}{1} \text{ ou } \frac{2000}{1} \text{ ou encore } \frac{200}{1}.$$

On remarque que le passage d'un seuil de rétention nominal à un seuil de rétention absolu peut représenter un coût jusqu'à plusieurs dizaines de fois supérieur et pas toujours justifié.

- Indice de colmatage FI (cf page 359). L'abaissement de cet indice exprime une diminution du pouvoir colmatant d'une eau; il est souvent (eaux colloïdales) beaucoup plus significatif que la seule considération de la taille des particules en principe éliminées.

- **Paramètres liés à l'exploitation**

- Régénération ou consommation du matériau support.
- Perte de charge ou durée de cycle admissible.

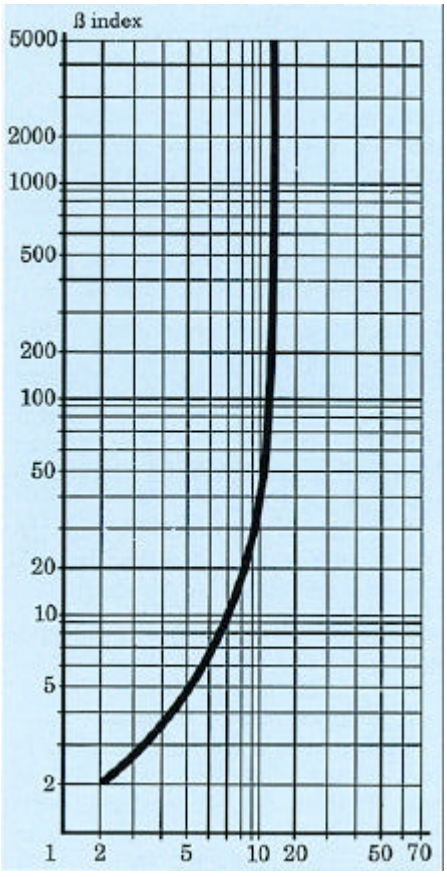


Figure 61. Exemple de mesure de l'indice ß

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- Concentration en matières en suspension de l'eau à traiter.
- Risques de relargages: supports ou matières retenues (rétentat).

5.3.2.3. Types de filtres

La distinction entre support mince et support épais devient illusoire du fait des seuils de rétention maintenant recherchés. On distingue

- **Les cartouches consommables**, équipées de:

- membranes plissées à partir de papier, de films de polycarbonate ou de Nylon 66, de textiles non tissés mais thennosoudés (polypropylène), en général non susceptibles de relargage. Elles peuvent présenter des seuils de rétention absolus compris entre 0,1 et 20 µm, et sont définissables par une surface filtrante,
- feutres, textiles non tissés, bobinés, plastiques agglomérés, qui sont susceptibles de relargage.

- **Les cartouches rétrolavables à l'eau,** équipées de :

- fibres et métaux frittés, à seuils nominaux s'étageant de 6 à 100 µm,
- tissus en crin monofibre (polyester) à seuils nominaux compris entre 20 et 100 µm.

La possibilité de rétrolavage ne concerne que les cartouches à seuil nominal élevé, fonctionnant sur des eaux peu chargées.

- **Les bougies régénérables**, équipées de

- métaux frittés ou céramiques,
- matières plastiques agglomérées.

La régénération est moins souvent assurée par rétrolavage à l'eau filtrée que par d'autres dispositions particulières et compatibles avec les supports (vapeur, acides, ultra sons, etc.).

D'une manière générale, que ce soit pour les cartouches rétrolavables ou les bougies régénérables, la finesse accrue des supports filtrants, et la filtration d'eaux colmatantes entrainent une dégradation progressive de ces supports; leur remplacement, après un certain nombre de cycles, devient nécessaire.

5.3.3. Filtration sur support avec précouche

C'est une filtration en épaisseur réalisée sur un média transitoire, maintenu par un **support mince** et constitué soit par l'apport extérieur d'une précouche (aide de filtration) soit à partir de la suspension à filtrer elle-même.

Dans une phase initiale du cycle d'exploitation, l'opération **d'empâtage** consiste à recirculer sur le filtre la bouillie d'aide de filtration ou la suspension elle-même de façon à ce que les particules les plus grosses puissent s'entremêler et constituer des ponts au-dessus des orifices du support mince dont les ouvertures représentent plusieurs fois le diamètre de ces particules. Une précouche filtrante peut alors se former et constituer le gâteau filtrant dont l'épaisseur possible définit la longueur du cycle entre lavages.

En cycle de filtration, il peut être nécessaire d'ajouter, en continu, un adjuvant de filtration soit pour ralentir l'accroissement de la perte de charge soit pour améliorer le filtrat. C'est le **nourrissement** ou **alluvionnage**

- **Applications**

La filtration avec apport de précouche ou empâtage concerne des liquides en général très peu chargés et les durées de cycles évoluent de quelques jours à quelques semaines

- condensats de centrales,
- condensats huileux de rechauffage,
- bières et vins,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- fluides de coupe aqueux en rectification, - fluides hydrauliques,
- sirops de sucrerie et glucoserie.

La filtration avec autoformation de la précouche concerne des suspensions de 0,5 à plusieurs $g.l^{-1}$ de matières en suspension et les durées de cycles peuvent se limiter à quelques heures. On peut citer
- jus troubles de carbonatation en sucrerie,
- moûts de brasserie
- Fonds de tank,
- pulpes d'hydrométallurgie.

- **Matériaux de précouche et d'alluvionnage** Suivant les applications on peut utiliser différents matériaux

- **la cellulose**, sous forme de fibres à haute pureté, a un pouvoir filtrant comparable à celui d'un papier filtre lent mais ne possède qu'un très faible pouvoir adsorbant. Insoluble dans l'eau froide ou tiède, elle commence à s'hydrolyser à partir de 85 °C,
- **les diatomées** sont des carapaces siliceuses fossiles d'origine marine, très fines (5 à 100 µm) et ayant un certain pouvoir adsorbant. En présence d'eaux chargées de colloïdes, elles permettent une meilleure clarification.

Elles sont également capables d'adsorber des impuretés en émulsion telles que les huiles ou les hydrocarbures. La silice des diatomées est très légèrement soluble dans les eaux déminéralisées (surtout si alcalines),
- **le charbon actif** peut être utilisé sur une couche support de cellulose ou de diatomées pour obtenir une décoloration et une élimination presque totale des matières organiques d'origine végétale, en raison de son très haut pouvoir adsorbant,
- **les résines échangeuses d'ions** en poudre, cationiques et anioniques, mélangées en proportion variable, permettent une filtration avec élimination poussée du fer colloïdal ou une déminéralisation totale des condensats des centrales thermiques et nucléaires.

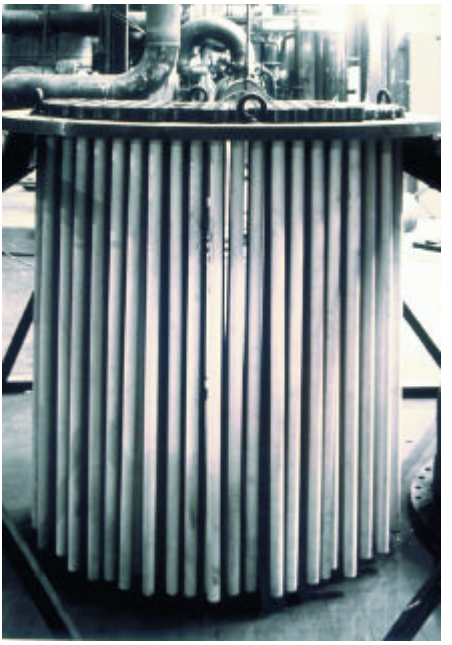


Figure 62. Plaque support équipée de bougies.

- **Lavage**

Lorsque la perte de charge atteint la valeur maximale permise par construction, on procède au lavage par retour d'eau. Pour que ce lavage soit efficace, il

Figure 63. Installation de SHELL, BRENT (Mer du Nord). Débit: 2100 $m^3.h^{-1}$. Filtres à précouche

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

faut que la précouche et les matières retenues par la précouche se détachent parfaitement du support sans provoquer son encrassement progressif.

5.4. FILTRATION SUR LIT GRANULAIRE

5.4.1. Principe et contrôle

L'eau à filtrer passe à travers un lit filtrant constitué de matériau granulaire, dont la hauteur de couche est importante et dépend du type de filtre. Les matières en suspension sont retenues dans les espaces intergranulaires, sur la plus grande partie de la hauteur de couche. Le fonctionnement du filtre est généralement suivi à l'aide de deux moyens de contrôle.

5.4.1.1. Mesure et évolution de la qualité de l'eau filtrée

La figure 64 donne l'évolution de la turbidité du filtrat et définit les périodes de fonctionnement caractéristiques du filtre
C= période de maturation,
b = période de fonctionnement normal,
d = début de crevaison du filtre,

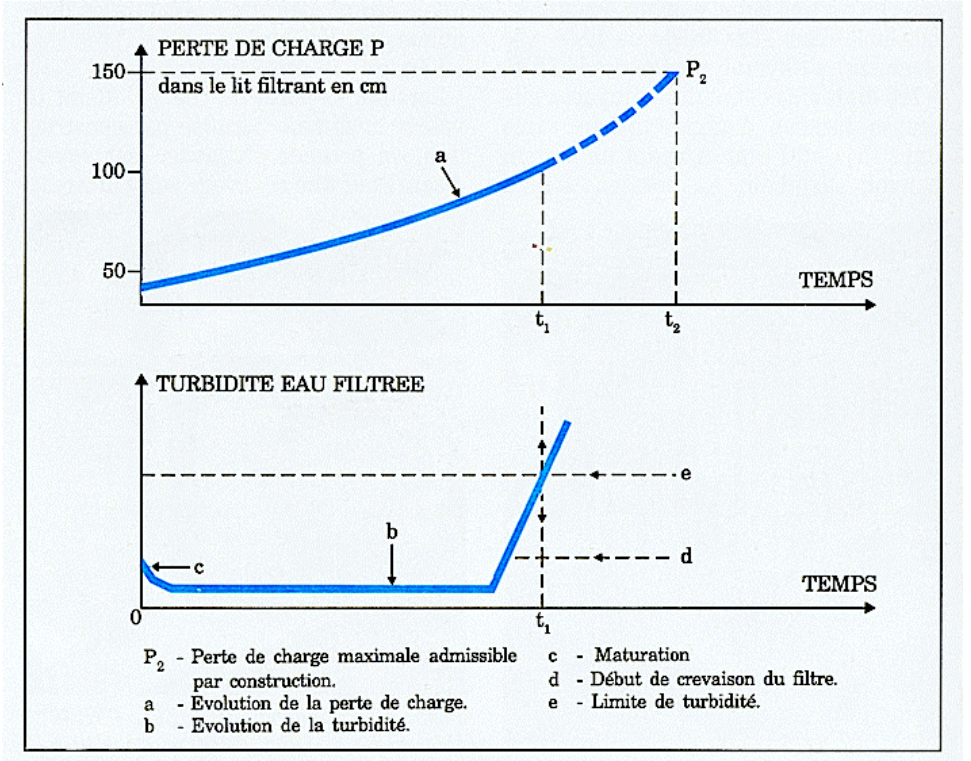


Figure 64. Courbes de filtration sur lit granulaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

e = limite de turbidité acceptable; la turbidité de l'eau filtrée atteint cette valeur pour un temps t1

5.4.1.2. Mesure et évolution de la perte de charge

On établit le graphique donnant l'évolution de la perte de charge P en fonction du temps (cf. figure 64). Par construction, il existe une perte de charge maximale que le filtre ne pourra dépasser: par exemple P_2 =150 h Pa (=150 cm CE). Cette perte de charge est atteinte après un temps t_2, caractéristique importante du fonctionnement du filtre.

5.4.1.3. Optimisation du fonctionnement

Pour obtenir un fonctionnement optimal du filtre, il importe que le filtre atteigne sa perte de charge P2 correspondant au temps (t_2) avant d'avoir crevé au temps (t_1), c'est à dire que

$$t_1 > t_2$$

Pour une eau coagulée avec un sel métallique, t_1 et t_2 sont donnés par les formules expérimentales suivantes (Richard et Croce-Spinelli), indiquant la variation de t_1 et t_2 en fonction des caractéristiques de fonctionnement

$$t_1 = a.v^{-0,95}.K^{0,75}.D^{-0,45}.L^{0,95}.V^{1,85}$$

$$t_2 = b.v^{-0,75}.K^{-0,7}.D^{1,5}.P^{0,9}.V^{-0,65}$$

avec:

D : taille effective du matériau,

L : hauteur de couche,

P : augmentation de perte de charge,

V : vitesse de filtration,

K : cohésion du floc retenu,

v : volume de matières en suspension (loculées de l'eau à filtrer.

La taille effective du matériau filtrant, et la cohésion du floc retenu sont des paramètres essentiels de la variation de t_1 et t_2 Les coefficients a et b sont expérimentaux. Les formules permettent, à partir d'un seul essai de filtration, de prévoir les différents temps t_1 et t_2 correspondant à différentes conditions opératoires.

5.4.1.4. Courbes de pression

Les graphiques de la figure 65 représentent un filtre ouvert, ayant une hauteur de sable égale à BD et une hauteur d'eau de AB. Sur le graphique de droite sont portées en ordonnées les hauteurs de prises de pression A, B, C, D, comptées au-dessus du plancher D du filtre, et en abscisses les pressions représentées en hauteur d'eau, avec la même échelle qu'en ordonnées. Ainsi au point B du filtre, situé au sommet du lit filtrant, la pression est toujours égale à la hauteur d'eau AB, reportée en B'b. Au point C du lit filtrant, la pression a pour valeur AC, reportée en $C'c_o$ quand le filtre est à l'arrêt; de 187 même, la pression statique au niveau du plancher est égale à AD reportée en $D'd_o$.

Tous les points représentatifs de la pression statique aux différents niveaux du filtre sont sur la droite à 45° $A'd_o$.

Filtre en service, et pour un sable homogène la perte de charge dans le sable propre est, d'après la loi de Darcy, proportionnelle à la hauteur de sable et au débit, admis constant pour cette analyse. La pression au point C du filtre devient égale à $C'c_l$, la valeur c_0c_1, représentant la perte de charge du sable entre les niveaux B et C ; de même, au niveau du plancher, la pression en D devient égale à $D'd_l$, la perte de charge dans le sable propre étant d_od_l.

La ligne bc_1d_1 est une droite puisque c_0c_1 et d_od_l sont proportionnels à la hauteur de sable (Darcy).

Quand le sable a achevé sa période de maturation, le report des pressions $C'c_2$, $D'd_2$ aux différents niveaux du sable donne la courbe bc_2d_2 représentative des pressions dans le filtre; elle a une partie

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

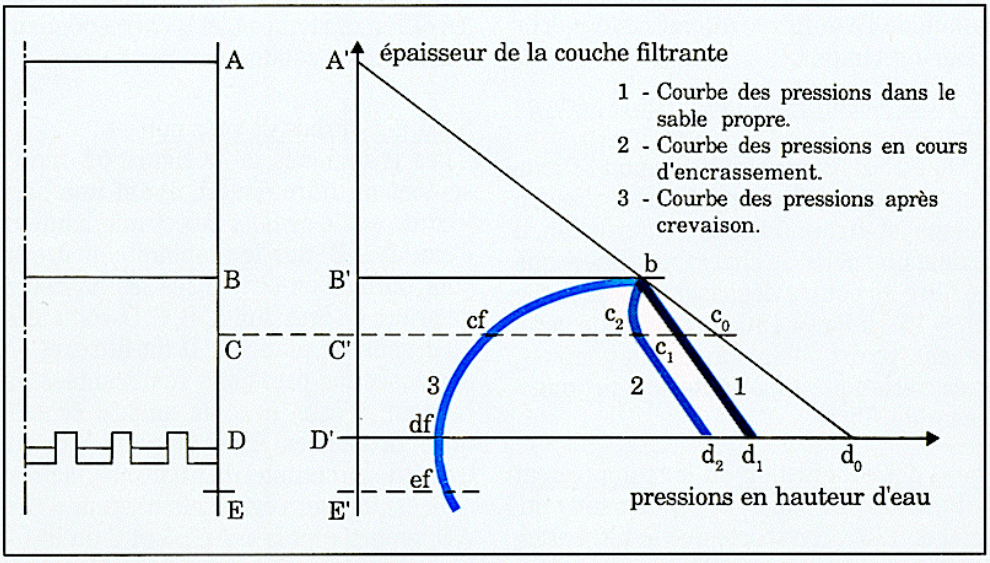


Figure 65. Pressions dans un lit filtrant.

curviligne et une partie linéaire parallèle à la droite bd_1 représentative de la perte de charge filtre propre. Le point c_2 figuratif du début de la perte de charge linéaire indique le niveau C atteint par des impuretés dans le sable; en-dessous de C, la perte de charge étant linéaire, le sable est propre. Le point c2 caractérise la hauteur BC **du "front de filtration"** au temps considéré.

La hauteur minimale de sable et la perte de charge minimale à prévoir avant encrassement sont donc respectivement BC et c_0c_2.

Le déplacement du point c_2 au cours de l'encrassement, représente l'avancement du front de filtration. Dans le cas de la figure 65 où le filtre ne donne plus d'eau claire quand est atteinte la perte de charge maximale P_2 la courbe représentative des pressions aux différents points du filtre est donnée par $bc_fd_fe_f$: elle atteint le plancher sans avoir de partie linéaire c'est-à-dire que le front de filtration a dépassé le plancher et que le filtre est déjà crevé.

Si on avait travaillé avec un filtre ayant une hauteur de sable plus importante, la courbe représentative de la pression aux différents points du filtre pour la perte de charge maximale disponible serait devenue linéaire au point ef : ceci donne immédiatement la hauteur minimale DE de sable qu'il aurait fallu ajouter pour que $t_1 = t_2$

L'expérience montre que les valeurs de t1 correspondant à différentes hauteurs d'un sable défini sont sensiblement proportionnelles aux épaisseurs correspondantes.

5.4.1.5. Capacité maximale de rétention d'un filtre

Les matières en suspension se logent entre les grains du matériau filtrant. Étant donné qu'il faut toujours laisser un passage suffisant pour l'écoulement de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

l'eau, on ne peut guère espérer remplir en moyenne que le quart du volume total des vides du matériau.

Pour une hauteur de couche de 1 m, et pour une surface filtrante de 1 m^2, soit un volume de 1 m^3 de matériau, il y a environ 45 0 litres de vide quelle que soit la granulométrie, le volume utilisable par les particules à retenir est de l'ordre de 110 litres, sous réserve que la taille effective du matériau filtrant et la perte de charge prévue à la construction, soient adaptées à la nature de ces particules.

Lorsque le filtre est à fonctionnement gravitaire (filtre ouvert) et que les matières en suspension à retenir sont à base de floc d'hydroxyde, la teneur en MS de ce floc n'excède pas 10 $g.l^{-1}$ de sorte que la quantité éliminable par m^3 de matériau filtrant est limitée à 110 *x* 10 =1100 g.

Cette valeur augmente lorsque le floc est chargé de matières minérales denses (argiles, carbonate de calcium). Il peut atteindre pour une boue à 60 $g.l^{-1}$ de MS

$$110 \times 60 = 6\,600 \text{ g}$$

Dans le cas de filtration sous pression d'impuretés industrielles, la hauteur de couche peut atteindre 2 m et la perte de charge 0,5 bar, voire 2 bars. On peut alors retenir dans le filtre des quantités de matières allant jusqu'à

- $CaCO_3$: 4 à 15 kg par m^2 de surface filtrante
- limon huileux: 10 à 25 kg -battitures : 20 à 100 kg

Ces valeurs permettent d'apprécier la teneur maximale en matières à retenir qu'ii est possible d'admettre dans l'eau brute alimentant un filtre, lorsqu'on a défini sa vitesse de filtration et la durée du cycle entre deux lavages.

Par exemple, un filtre de 1 m de hauteur de couche travaillant à la vitesse de 10 $m.h^{-1}$, que l'on veut laver toutes les 8 heures (80 m^3 d'eau par m^3 de lit filtrant entre lavages) ne peut accepter plus de

$\frac{1100}{80} = 13{,}75$ $mg.l^{-1}$ de matières en suspension floculée ou plus de

$\frac{6600}{80} = 82{,}5$ $mg.l^{-1}$ de matières en suspension minérales denses.

Pour les matières en suspension dans les rivières, la valeur est intermédiaire.

5.4.2. Le milieux poreux

5.4.2.1. Caractéristiques physiques

Un matériau est caractérisé par différents facteurs détaillés au chapitre 5, page 378:

- **la granulométrie**
- **la taille effective** (TE)
- **le coefficient d'uniformité (CU)**
- **la forme des grains:** anguleux (matériau concassé), ou ronds (sable de rivière et de mer). On obtient des qualités d'eau filtrée semblables avec un matériau anguleux de taille effective plus faible que celle d'un matériau à grains ronds.

A granulométrie égale, l'accroissement de perte de charge est plus faible avec des grains anguleux qu'avec des grains ronds, car contrairement à ce que l'on peut penser, les grains anguleux s'imbriquent moins facilement les uns dans les autres que les grains ronds, et laissent des sections de passage plus grandes

- **la friabilité** qui permet de chois ir les matériaux susceptibles d'être utilisés en filtration, sans risque de production de fines par les opérations de lavage.

Un matériau trop friable est à proscrire, surtout dans un filtre fonctionnant de haut en bas et dont le lavage se termine par une phase d'expansion à l'eau seule

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

car les fines formées bloquent l'encrassement en surface

- la perte à l'acide: il est bien évident qu'on ne peut tolérer une perte à l'acide importante quand l'eau est susceptible de contenir du gaz carbonique agressif ou toute acidité minérale,

- la masse volumique des grains constituant le milieu filtrant,

- **les masses volumiques apparentes dans** l'air et l'eau.

D'autres caractéristiques sont spécifiques des matériaux adsorbants comme le charbon actif; elles sont examinées au chapitre 5, page 383.

5.4.2.2. Nature du milieu poreux

Le **sable** quartzeux a été le premier des matériaux utilisés pour la filtration et c'est encore le matériau de base pour la plupart des filtres actuels.

L'anthracite ou le **marbre** peuvent lui être substitués quand il est nécessaire d'éviter toute trace de silice dans les traitements industriels, ou quand leur approvisionnement est plus facile.

Pour certains traitements tels qu'affinage, traitement tertiaire des eaux résiduaires, etc., il est intéressant d'utiliser **des matériaux à forte surface spécifique**, tels que BIOLITE, schistes expansés, pouzzolane, etc.

Certains filtres utilisent une combinaison de plusieurs matériaux (filtres multicouches). Le sable peut alors être associé à de l'anthracite, du grenat, des schistes plus ou moins poreux, etc., à condition que la friabilité de ces matériaux soit faible ainsi que leur perte à l'acide.

Enfin, la filtration peut s'effectuer sur du **charbon actif granulé**, suffisamment résistant:

- en remplacement du sable après un traitement de décantation quand on veut à la fois éliminer le floc résiduel et lutter par adsorption contre une pollution,
- en second étage de filtration pour un traitement d'affinage seul ou de déchloration.

5.4.2.3. Choix de la granulométrie d'une couche filtrante

Ce choix est à faire avec celui de l'épaisseur de la couche et de la vitesse de filtration. Il dépend de la nature de l'eau à filtrer (filtration directe d'eau brute, filtration d'eau décantée, filtration biologique d'eau résiduaire secondaire ou tertiaire) et de la qualité de l'eau que l'on désire obtenir. Il dépend également du type de filtre utilisé (filtre sous pression ou filtre ouvert) et de la perte de charge disponible. Le tableau suivant montre l'influence de divers paramètres sur la qualité de l'eau et la durée de vie des cycles.

	Diamètre des grains	**Hauteur de couche**	**Vitesse de filtration**	**Perte de charge disponible**
Qualité de l'eau filtrée	↘	↗	↘	=
Durée des cycles	↗	↗	↘	↗
Charge au m2	=	↗	=	↗

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans le cas le plus général, le sens de filtration est descendant. Selon le type de lavage adopté (voir page 192), on distingue trois types de filtration qui correspondent à un choix de granulométries différentes:

- **la filtration sur couche de matériau homogène:** le lavage de ce matériau est effectué à l'air et à l'eau, sans expansion hydraulique lors de la phase finale de rinçage. Il en résulte une homogénéité parfaite de la couche de filtration: la granulométrie du matériau filtrant est la même à la base et au sommet de la couche filtrante. Au cours du cycle de filtration, le front de filtration s'établit et progresse régulièrement, ce qui facilite la maîtrise du cycle de filtration. Dans la couche filtrante, l'évolution des courbes de pression est schématisée par la figure 66.
- **filtration sur couche de matériau hétérogène.** Lorsque le lavage s'effectue avec seulement de l'eau, ou comporte en phase finale un rinçage avec mise en expansion hydraulique du matériau, on observe un classement du matériau filtrant dont la couche n'est plus homogène. Les grains les plus gros sont à la base de filtre, alors que les grains les plus fins sont en surface. Au cours du cycle de filtration, le matériau fui reçoit l'eau à épurer contenant toutes les matières à retenir, alors que le matériau le plus gros reçoit une eau plus propre: la maîtrise du cycle de filtration est alors plus difficile, les cycles sont plus courts, étant donné l'effet de tamisage que le matériau fui réalise à la surface du filtre. Dans la couche filtrante (évolution des courbes de pressions est schématisée par la figure 67.
- **filtration à plusieurs couches filtrantes:** les observations précédentes ont conduit à mettre en oeuvre une filtration comp ortant deux couches filtrantes (= fil-

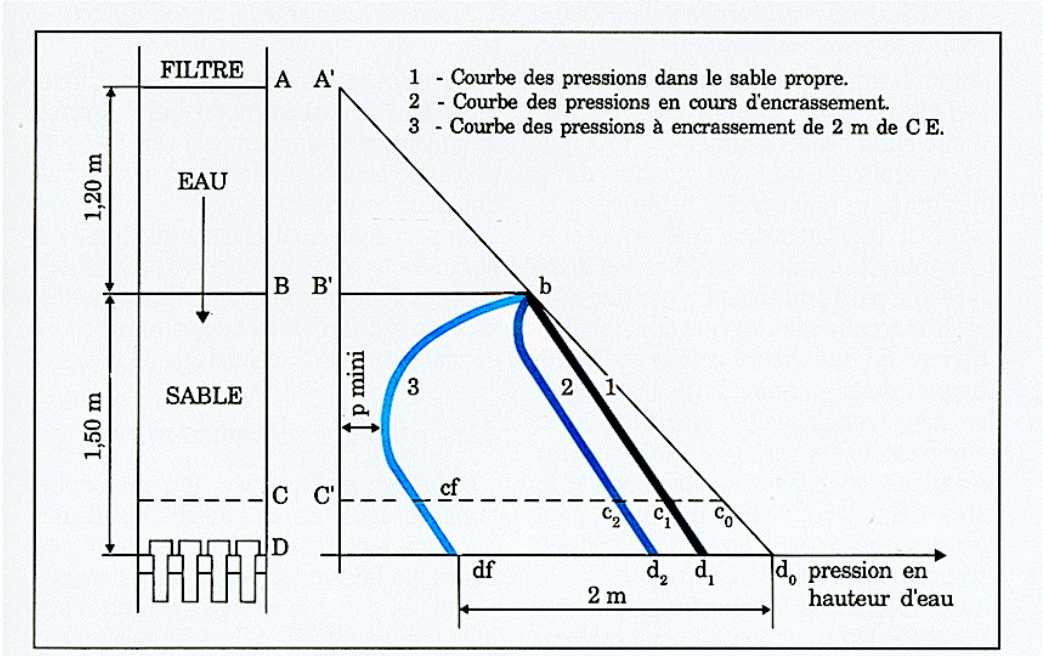


Figure 66. Courbe de pression dans un filtre à couche unique homogène type AQUAZUR V.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

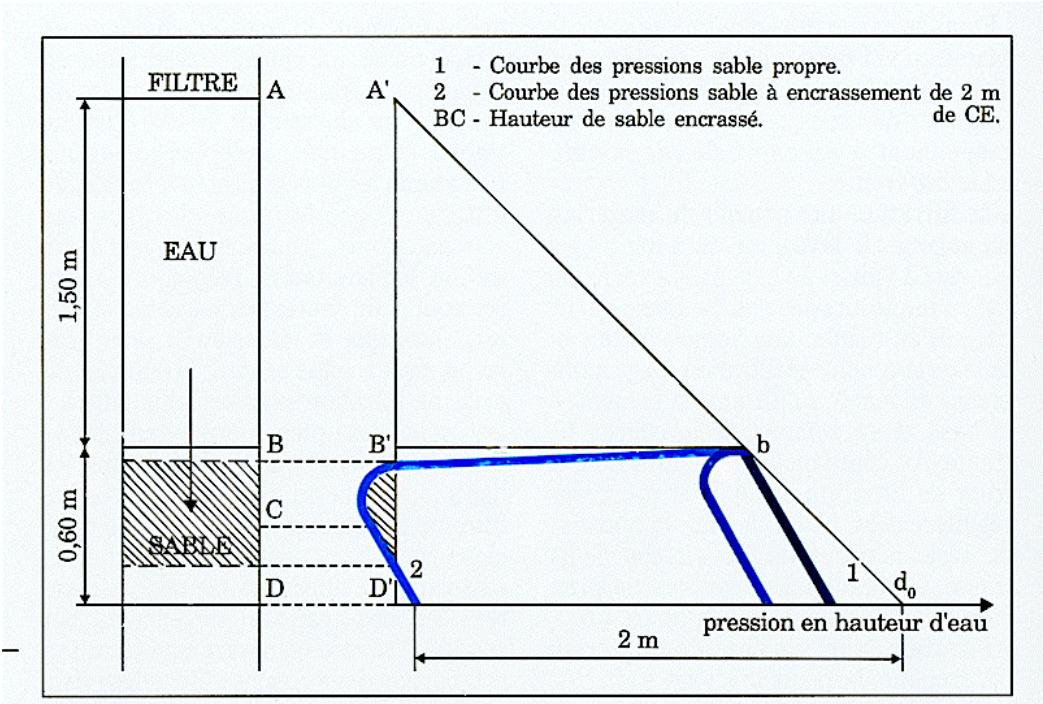


Figure 67. Courbes de pression dans un filtre à couche unique hétérogène (la portion de sable hachurée se trouve sous vide).

tration bicouche), voire plusieurs couches filtrantes (= filtration multicouche).

Pour éviter l'effet de tamisage provoqué par les grains de sable les plus fins dans une filtration sur couche hétérogène et favoriser la pénétration des impuretés dans toute la hauteur du filtre, on remplace une partie du sable fin par une couche de matériau plus léger et dont la taille effective est supérieure à celle du sable. Le choix de la granulométrie de chacune des deux couches doit être faite avec soin.; il est lié à la possibilité de les mettre en expansion de façon semblable avec le même débit d'eau de lavage, afin de pouvoir les reclasser à la fin de chaque lavage, avant remise en filtration.

Cette disposition (très ancienne puisque utilisée dès 1880 par Smith, Cuchet et Montfort) permet d'obtenir une répartition des MES retenues: les plus grossières sont retenues dans la couche supérieure de grosse granulométrie, alors que la couche inférieure, de faible granulométrie, sert de finition et de sécurité.

On peut également réaliser une filtration sur trois ou plusieurs couches, qui améliore la pénétration en profondeur des impuretés, mais au prix de diverses sujétions de choix de matériaux et de technologie de lavage.

5.4.3. Lavage du milieu filtrant

Le lavage est une opération très importante: lorsqu'il est insuffisant, il entraîne le colmatage permanent de certaines zones, ne laissant à l'eau qu'un passage réduit; la perte de charge s'accroît alors plus vite, la filtration devient localement plus rapide et moins efficace.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Pour laver le matériau filtrant, on le soumet à un courant d'eau, circulant de bas en haut, destiné à détacher les impuretés et à les entraîner ensuite dans une goulotte d'évacuation. Le matériau filtrant doit être simultanément agité dans le courant d'eau. Pour obtenir ce résultat, on peut employer plusieurs méthodes.

5.4.3.1 Lavage par mise en expansion à l'eau seule

On choisit un débit d'eau suffisamment élevé pour mettre le matériau filtrant en expansion, c'est-à-lire pour que son volume apparent augmente de 15 % au minimum.

Étant donné la variation de la viscosité de l'eau en fonction de la température, il est souhaitable dans certains cas de prévoir un système de mesure et de régulation du débit d'eau de lavage afin d'ajuster ce débit pour maintenir constant dans le temps le taux d'expansion désiré.

La couche en expansion est alors le siège de courants de convection, le matériau filtrant circulant vers le bas dans certaines zones et vers le haut dans les zones voisines.

De ce fait, il arrive que des morceaux de la couche compacte de boue qui forment une croûte à la surface du matériau filtrant soient entraînés en profondeur et, sous l'action des courants tourbillonnaires, forment des boules dures et volumineuses **(mud-balls).** On peut les combattre en brisant la croûte superficielle à l'aide de violents jets d'eau sous pression, distribués par tuyères tournantes ou fixes (laveurs de surface).

Ce mode de lavage exige beaucoup de précautions et impose de mesurer la valeur de l'expansion du matériau filtrant Son plus grave défaut est d'aboutir à un classement granulométrique, concentrant les fines de matériau filtrant en surface et défavorable à une filtration de haut en bas.

5.4.3.2. Lavage sans mise en expansion, par air et eau simultanés

Une deuxième méthode, maintenant généralisée, consiste à utiliser un faible débit de retour d'eau, insuffisant pour provoquer l'expansion du sable, et à agiter en même temps celui-ci par une injection d'air surpressé. Le sable n'étant plus mis en expansion, et la croûte superficielle étant parfaitement détruite par l'air, les "mud-balls" ne peuvent pas se former; elles sont totalement inconnues avec ce mode de lavage.

Pendant cette ,période de **soufflage,** plus le débit d'eau de lavage est fort, plus rapide et plus efficace est le lavage. La valeur minimale à adopter pour un lavage efficace et la valeur maximale à ne pas dépasser pour éviter une perte de matériau filtrant, dépendent à la fois de ce matériau et de la technologie du filtre.

Lorsque les impuretés ont été évacuées du matériau filtrant et rassemblées dans la tranche d'eau qui sépare celui-ci de la goulotte d'évacuation, il faut "rincer", c'est-à-dire remplacer cette tranche d'eau boueuse par de l'eau claire.

Plusieurs méthodes de **rinçage** peuvent être employées après arrêt de la soufflerie

- maintenir constant le débit d'eau de retour jusqu'à ce que l'eau évacuée soit claire. Le temps de cette opération est d'autant plus court que le débit d'eau est plus grand (il doit toujours être supérieur à 12 $m^3/h.m^2$) et que l'épaisseur de la couche d'eau au-dessus du matériau filtrant est plus faible,
- augmenter le débit d'eau pendant le rinçage pour le porter au moins à 15 $m^3/h.m^2$,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- balayer la surface du filtre par un courant horizontal d'eau brute ou d'eau décantée conjugué au retour d'eau,
- vider l'eau boueuse située au-dessus du matériau filtrant et balayer la surface de celui-ci comme précédemment.

5.4.3.3. Lavage à l'eau et à l'air, utilisés successivement

Ce lavage est utilisé lorsque la densité du matériau filtrant ne permet pas de mettre en oeuvre, simultanément, l'air et l'eau de lavage sans risquer l'entraînement du matériau à l'égout par l'eau de lavage; c'est le cas d'un lit filtrant constitué de sable fin ou de matériaux de faible densité (anthracite, charbon actif, BIOLITE). Ce mode de lavage est également utilisé pour les filtres bicouche. Dans la première phase de lavage, l'air est utilisé seul pour détacher du matériau filtrant les impuretés retenues. Dans la deuxième phase, un retour d'eau à fort débit, assurant une mise en expansion du ou des matériaux filtrants, permet d'extraire du lit et d'évacuer les impuretés détachées lors de la première phase. Dans le cas d'impuretés lourdes ou particulièrement difficiles à éliminer (eaux résiduaires, par exemple), on peut répéter plusieurs fois cette séquence.

5.4.3.4. Lavage par tranches

Le lavage concerne normalement toute la surface d'une unité filtrante. Dans certains types de filtres, il peut être réalisé par tranche (cf. figure 68).

Dans le filtre, des parois fixes délimitent des cellules unitaires de lavage. Un dispositif mobile vient s'adapter successivement au-dessus de chacune. Les eaux boueuses sont aspirées à travers la couche de sable de la tranche, et renvoyées dans une goulotte latérale. L'eau de lavage est fournie directement par les cellules adjacentes de la cellule en cours de lavage. Les cellules sont lavées successivement.

Ce type de lavage peut être continu. Il a pour inconvénients principaux
- un lavage réalisé à l'eau seule et sans air,
- l'impossibilité de limiter le débit d'eau filtrant à travers la cellule remise en filtration: la vitesse est alors plus élevée, puisqu'il n'y a pas de système cellulaire de régulation et peut conduire, dans certains cas, à une détérioration de la qualité de l'eau filtrée,
- le risque de manque d'isolement des cellules.

Si ce type de lavage peut se justifier dans certains cas (filtration d'eaux de circuits de refroidissement, d'eaux résiduaires, etc.), il n'est pas d'une sécurité suffisante pour la filtration d'eaux de bonne qualité (eaux potables, etc).

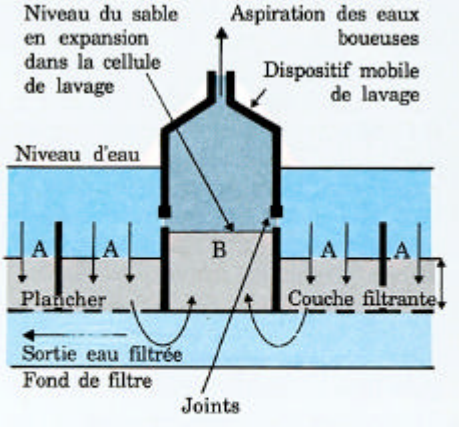


Figure 68. Principe d'un filtre à lavage par tranches.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.4.3.5. Fréquence de lavage et consommation d'eau de lavage.

La fréquence des lavages dépend de la nature de l'eau à filtrer ainsi que de la nature et de la quantité de MES à retenir. Il faut déclencher le lavage lorsque la perte de charge atteint sa valeur maximale ou lorsque le filtre commence à crever. En pratique, le lavage est souvent déclenché après filtration d'un certain volume d'eau, déterminé d'après les conditions de fonctionnement et l'expérience de l'exploitant.

La consommation d'eau de lavage est essentiellement fonction de la nature et du poids des particules retenues par m^3 de matériau filtrant. L'utilisation conjointe d'air de lavage et d'eau décantée permet de réduire d'environ 20 à 30% la consommation d'eau par rapport au lavage à l'eau seule.

La consommation d'eau de lavage est d'autant plus forte que :

- l'épaisseur d'eau au-dessus du matériau filtrant est plus grande,
- le débit du retour d'eau seule est plus faible,
- les goulottes d'évacuation des boues sont plus écartées les unes des autres,
- la quantité de boues à évacuer est plus grande,
- la cohésion et la densité des boues sont plus fortes.

Cette consommation est également accrue lorsqu'on utilise des laveurs de surface.

5.4.4. Filtration lente et filtration rapide

5.4.4.1. Filtration lente

La filtration lente a pour but l'épuration des eaux de surface, sans coagulation ni décantation préalable. La coagulation des matières colloïdales est réalisée par les enzymes secrétés par des algues et des micro-organismes qui se fixent sur le sable (membrane biologique). Pour obtenir de bons résultats, il faut généralement trois étages de filtration

- des dégrossisseurs travaillant de 20 à 30 $m^3/h.m^2$,
- des préfiltres travaillant de 10 à 20 $m^3/j.m^2$
- des filtres travaillant de 2 à 5 $m^3/j.m^2$. La faible vitesse de filtration permet une perte de charge assez réduite à chaque étage et les filtres sont lavés en moyenne une fois par mois. Les dégrossisseurs et les préfiltres le sont plus souvent, en fonction de la turbidité de l'eau brute.

Après lavage, la qualité de l'eau filtrée n'est pas satisfaisante et il faut laisser couler à l'égout, en attendant que la membrane biologique se reforme, ce qui demande quelques jours.

La filtration lente donne de bons résultats de clarification, tant que l'eau demeure peu chargée en MES et que l'on respecte une faible vitesse finale de filtration, mais dès que l'eau devient chargée, les dégrossisseurs et les préfiltres ont une efficacité insuffisante et la turbidité de l'eau traitée peut monter bien au-delà de la limite fixée parles normes si on ne réduit pas encore la vitesse de filtration.

Ces filtres sont particulièrement sensibles à un développement important de plancton qui les expose au blocage en surface.

De plus, des filtres lents travaillant sur une eau de surface très chargée en matières organiques et en polluants chimiques peuvent donner une eau présentant encore des mauvais goûts.

Par ailleurs, l'action biologique des filtres lents ne permet pas d'éliminer tous les micropolluants (phénols, détergents, pesticides); ainsi, le rendement d'élimination des pesticides organochlorés n'est que de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

50 % environ. Les métaux lourds sont mal retenus.

5.4.4.2. Filtration rapide.

Selon le cas d'application, la filtration rapide met en oeuvre des vitesse allant de 4 à 50 $m^3/h.m^2$,

- **en traitement d'eau potable** l'action biologique est faible; on constate tout au plus une nitrification dans certains cas où la vitesse est limitée, la teneur en oxygène suffisante et les conditions nutritives favorables aux bactéries nitrifiantes.

On distingue essentiellement

- la filtration directe, où l'eau à traiter ne subit aucun apport de réactif,
- la filtration avec coagulation, sur filtre d'une eau non décantée au préalable; les réactifs utilisés peuvent être un coagulant, un adjuvant de floculation et un réactif d'oxydation,
- la filtration d'une eau coagulée et décantée ou flottée.

Dans ce dernier cas, les filtres se trouvent alors dans la situation idéale consistant à recevoir une eau de qualité pratiquement constante et faiblement chargée. Les vitesses de filtration sont liées à la qualité du filtrat désiré; elles peuvent s'échelonner entre 5 et 20 $m^3/h.\ m^2$ suivant la qualité de l'eau décantée et la nature des filtres utilisés.

On peut également utiliser deux filtrations en série, chaque étage de filtration pouvant être précédé d'une coagulation, avec addition d'adjuvant et d'oxydant.

- **en traitement d'eaux résiduaires** (urbaines ou industrielles), la filtration est toujours associée à une activité biologique du fait de l'importance de la pollution organique, de l'apport éventuel d'oxygène et de la température.

5.4.5. Sens de filtration

L'eau à filtrer traverse généralement le milieu filtrant en s'écoulant du haut vers le bas, le milieu filtrant étant complètement immergé. L'eau s'écoule soit gravitairement, soit sous pression.

Dans certains filtres, le milieu filtrant n'est pas complètement immergé et l'eau s'écoule alors par ruissellement dans la masse filtrante: ce sont les filtres "secs" particulièrement utiles pour certains traitements biologiques (voir page 312).

D'autres filtres utilisent un sens de filtration ascendant, l'eau percolant le milieu filtrant de bas en haut. Dans cette technique, la capacité de stockage peut être plus élevée mais la perte de charge est limitée par le poids du matériau filtrant; au-delà de cette limite, le matériau est poussé vers le haut et le filtre crève. Afin d'éviter cet inconvénient, il est nécessaire de prévoir la mise en place d'un système de blocage du matériau filtrant (grille...). Ce système permet d'utiliser un matériau plus léger que l'eau.

On peut également prévoir un double sens de filtration: l'eau à filtrer pénètre dans le matériau filtrant à la fois par la partie supérieure et la partie inférieure de ce matériau; la reprise d'eau est effectuée au sein de la masse filtrante.

Une variante de la filtration ascendante met en oeuvre des matériaux flottants. Des études sont en cours.

Enfin, des essais ont été effectués pour réaliser un filtre où l'eau parcourt le milieu filtrant horizontalement. Les difficultés inhérentes au colmatage et au lavage de ce type de filtre ont limité cette technique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. CENTRIFUGATION

6.1. DÉFINITIONS

La centrifugation est un procédé de **séparation** qui utilise l'action d'une **force centrifuge** pour provoquer la décantation accélérée des particules d'un mélange solide-liquide. Dans l'enceinte de centrifugation se forment deux phases principales distinctes

- un culot de centrifugation **(sédiment)** qui n'a généralement pas une structure homogène: il y a, en effet, classification entre les particules de masses volumiques élevées (fond du culot de centrifugation) et les particules plus légères (colloïdes organiques par exemple),
- un liquide surnageant **(centrifugat ou centrat)** qui est souvent constitué d'une phase unique bien clarifiée ou parfois trouble (présence de très fines particules colloïdales peu décantables). Toutefois, il peut aussi comporter deux ou plusieurs phases si le liquide interstitiel du mélange comprend des éléments de masse volumique différente (présence d'huiles par exemple).

Force centrifuge

Dans une enceinte cylindrique (figure 69) tournant à une vitesse angulaire w (rad.s^{-1}) ou N (tours.min^{-1}) et contenant un anneau liquide de rayon moyen R (en m), l'accélération centrifuge y (en m.s-2) à laquelle les particules sont soumises, est donnée par:

$$y = ?\ ^2R = 0{,}011\ N^2R$$

L'accélération engendrée par une séparation centrifuge est toujours exprimée par référence au champ de gravitation terrestre en nombre de g :

$$G = \text{nombre de g} = \frac{\omega^2 R}{g} = 11{,}2.10^{-4}\ N^2.R$$

$(g = 9{,}81\ m.s^{-2})$

Si un décanteur statique clarifie une suspension selon les lois de la sédimentation mettant en jeu la seule force de gravitation terrestre, les machines tournantes industrielles (décanteuses) permettent des sédimentations accélérées sous l'action de champs centrifuges variant de 800 à 4000 g selon la taille de la machine.

La force exercée sur une particule de masse unitaire s'exprime par

$$Fc = 0{,}011\ N^2R\ (\varrho_s - \varrho_L) \times \frac{1}{g} = G\ (\varrho_s - \varrho_L)$$

avec:

Q_S : masse volumique de la particule

Q_L : masse volumique du liquide interstitiel

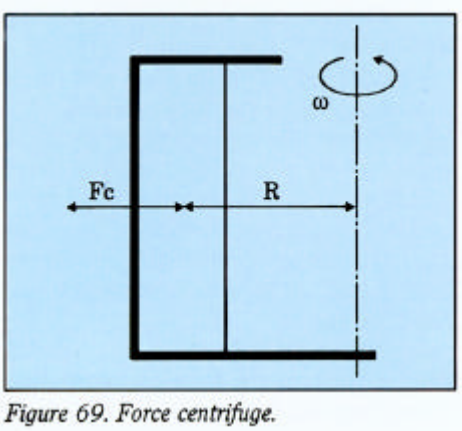


Figure 69. Force centrifuge.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.2. DOMAINES D'APPLICATION EN TRAITEMENT DES EAUX

- **Séparation des matières solides de suspensions très concentrées**

C'est l'application la plus répandue de la centrifugation. Utilisée ainsi pour le traitement des boues résiduaires, elle permet
- la déshydratation avec production d'un sédiment plus ou moins consistant selon la nature de la boue à traiter,
- l'épaississement accéléré de boues faiblement concentrées en vue de l'optimisation des filières de traitement des boues (application principale aux boues biologiques légères et éventuellement à certaines boues d'hydroxydes métalliques).

Les appareils industriels utilisés dans ces applications sont appelées **décanteuses continues,** machines tournantes à bol plein (pour les distinguer des autres machines à bol perforé et tamis que sont les essoreuses utilisées spécifiquement sur les produits chimiques cristallins).

L'utilisation de la force centrifuge peut aussi, mais plus rarement, avoir des applications dans les domaines suivants

- **Séparation de suspensions huileuses peu chargées en matières solides**

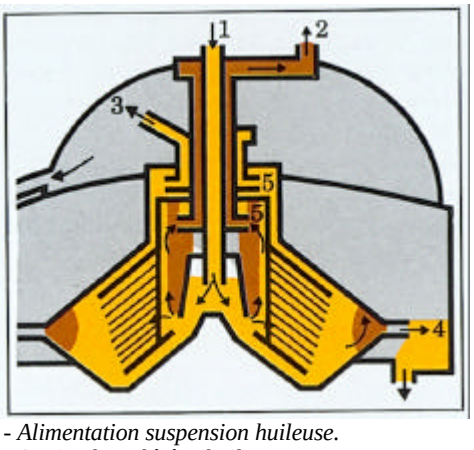
Sont alors utilisés des séparateurs à assiettes (cf. figure 70) encore appelés **clarificateurs** à disques, machines tournantes à bol plein et axe vertical, pouvant créer des champs centrifuges très élevés (3 000 à 8 000 g), en industrie automobile notamment

La phase solide est déchargée par des orifices calibrés de petit diamètre (1 à 2 mm) appelés buses, situés en périphérie du bol, ou, pour les petites machines, par ouverture périodique du bol (autodébourbeurs). Les séparateurs à assiettes permettent aussi la séparation des phases eau et huile.

- **Séparation de boues concentrées huileuses**

Lorsque le volume occupé par le sédiment devient trop important, il est alors possible de séparer les trois phases solide/eau/huile sur décanteuses continues trois phases, à axe horizontal.

Fiabilité et régularité de séparation des trois phases ne peuvent être assurées que si les caractéristiques physico-chimiques des boues sont relativement stables. En effet, le positionnement des différentes ouïes de reprise de l'eau et de l'huile est essentiel. La régularité de traitement dépend alors de la constance des volumes respectifs de sédiment/eau/huile (applications en raffinerie).



1. - Alimentation suspension huileuse.
2. - Sortie phase légère huile.
3. - Sortie phase eau.
4. - Sortie sédiment.
5. -Turbines centripètes.

Figure 70. Séparateur à assiettes trois phases. Coupe schématique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Séparation des particules lourdes** et de forte granulométrie par cyclonage

Le cyclonage utilise l'effet de la force centrifuge créée par une arrivée tangentielle de liquide dans une enceinte fixe cylindro-conique, en l'absence de toute partie mécanique mobile. Les accélérations créées sont faibles. Il est mis en oeuvre principalement pour le dessablage des eaux de gravières, de certaines eaux de surface, de caractère torrentiel, et des boues.

6.3. CENTRIFUGABILITÉ DES BOUES RÉSIDUAIRES

Si l'on soumet un échantillon de boue fraîche d'ERU (boue primaire + boue biologique colloïdale) dans une centrifugeuse de laboratoire à un champ de 1500 g pendant 1 à 2 min, on note dans le godet de centrifugation (voir figure 71)

- un liquide surnageant d'aspect trouble et contenant de fins colloïdes en suspension,
-un culot de sédiment pouvant se subdiviser en deux zones une zone inféreure concentrée de matières denses: teneur MS = 25 – 35%

$$\text{rapport } \frac{MV}{MS} = 55 - 65\,\%$$

une zone supérieure moins concentrée, de matières peu cohérentes donc assez pâteuses: teneur MS = 10 - 18

$$\text{rapport } \frac{MV}{MS} = 75 - 85\,\%$$

Si l'on répète la même expérience avec une boue (loculée au moyen d'un polyélectrolyte organique, on constate la formation

- d'un liquide clair surnageant, présentant une très faible teneur en MS,
- d'un culot très homogène présentant une bonne cohésion.

Cette aptitude de la suspension boueuse à pouvoir se séparer par centrifugation en laboratoire en deux phases franches traduit la "centrifugabilité" de la boue que le conditionnement par polymère a pour but d'améliorer. Elle se caractérise par

- la clarification du centrat dépendant du champ centrifuge, du temps de centrifugation et du dosage de polymère,
- le volume occupé par le sédiment car il conditionne le débit massique potentiel de la machine industrielle,
- la consistance du sédiment qui peut être mesurée par des méthodes de pénétrométrie. Ce paramètre, plus que la siccité, permet de prévoir la plus ou moins grande facilité d'extraction du sédiment

Un centrat de centrifugeuse ne peut jamais être totalement exempt de fins colloïdes (perturbations hydrauliques internes à la machine).

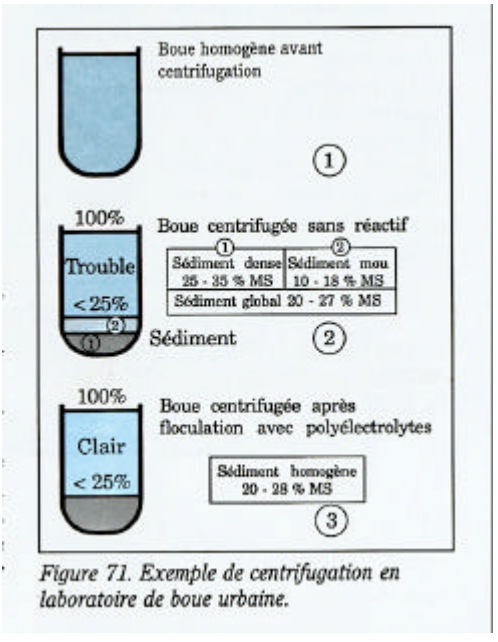


Figure 71. Exemple de centrifugation en laboratoire de boue urbaine.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.4. LES DECANTEUSES CONTINUES

Ce sont maintenant les seules centrifugeuses utilisées pour la clarification des boues résiduaires (figure 72).

Ces décanteuses comportent essentiellement un bol (1) cylindro-conique à axe horizontal, tournant à grande vitesse. A l'intérieur de ce bol tourne une vis sans fin hélicoïdale (2) disposée coaxialement, qui épouse parfaitement la surface interne du bol au j eu près entre bol et filets de vis. Ces deux rotors, bol et vis, tournent à des vitesses différentes; la différence de vitesse est appelée **vitesse relative ou Vr**.

Le produit à traiter (3) est introduit **axialement** dans la machine par distributeur approprié (4). Il est propulsé dans l'espace annulaire (5) formé par la face interne du bol et le corps de vis.

La décantation s'effectue essentiellement dans la partie cylindrique du bol. La vitesse relative de la vis par rapport au bol fait progresser le produit décanté (6) à l'intérieur du bol. Le convoyage des solides le long du cône permet de sortir le sédiment hors du liquide clarifié: l'alimentation étant continue, un niveau liquide (7) s'établit en effet dans la machine suivant une surface cylindrique qui constitue la surface interne de l'anneau liquide.

Lorsque le solide est sorti de l'anneau liquide, la partie résiduelle du cône jusqu'au diffuseur-éjecteur sert à l'égouttage final: cette partie est la plage de séchage (8). Le liquide clarifié (9) est récupéré à l'autre extrémité du bol (côté grand diamètre) par débordement au-dessus de seuils (10) réglables qui limitent l'anneau liquide dans la machine. Le rotor est protégé par un capot qui permet également la récupération du liquide clarifié et du sédiment.

Les décanteuses continues utilisées dans l'industrie pour la séparation des produits cristallins ont dû être adaptées au traitement des boues résiduaires. Ces décanteuses ont été choisies pour les raisons suivantes:

- fonctionnement rigoureusement continu (alimentation boue et évacuation sédiment),
- séparation des phases par décantation accélérée et transport par vis du sédiment évitant tout risque de colmatage, la phase liquide ne devant traverser aucun médium filtrant,
- production d'un sédiment homogène avec un taux de capture élevé, grâce à l'utilisation de polyélectrolytes.

Elles sont caractérisées par un ensemble de **paramètres géométriques**.

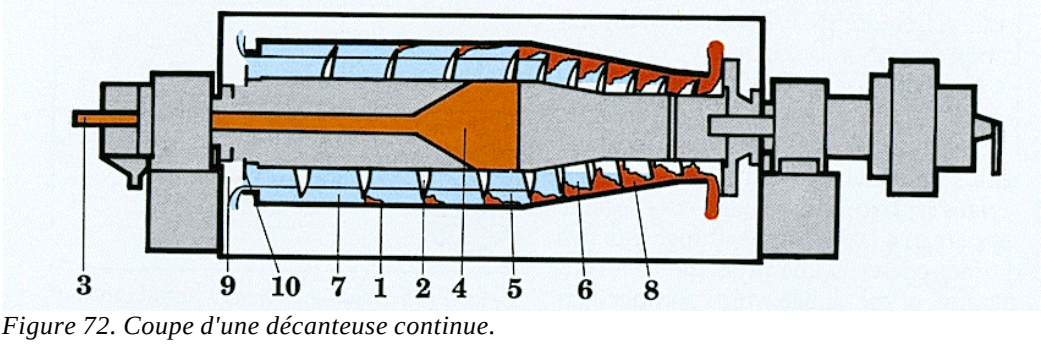


Figure 72. Coupe d'une décanteuse continue.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.4.1. Système équi-courant ou contre-courant (voir figures 73 et 74)

Les décanteuses continues se classent d'abord par les sens respectifs de parcours de la suspension boueuse et du sédiment.

En **équi-courant** (figure 73), la boue est introduite en tête de partie cylindrique si bien que le liquide et le solide progressent dans le même sens dans toute la partie cylindrique. La sédimentation s'effectue avec moins de perturbations hydrauliques sur un parcours plus long. D'où

- meilleure adaptation aux produits difficiles, de densité et concentration faibles, avec centrat plus clair,
- souvent moindre consommation de polymère.

Mais

- sensibilité plus grande à l'abrasion (tout le rotor est au contact du sédiment), - généralement, plus faibles capacités hydrauliques et sédiment un peu moins sec, -efforts plus importants entre vis et bol (convoyage du sédiment sur toute la longueur du bol):

En contre-courant (figure 74), la boue est introduite au niveau de la cassure cylindro-conique où il y a séparation rapide des matières solides.

D'où

- meilleure adaptation aux boues plus denses,
- abrasion plus localisée (partie conique seulement),
- capacités hyrauliques plus importantes (mais avec risque d'une moindre clarification due aux turbulences).

Des versions mixtes avec adaptation aux deux systèmes sont aussi disponibles.

6.4.2. Angle de conicité

Il est généralement compris entre 6 et 10°. Lorsque le sédiment entre en zone conique, il est soumis à une force de reflux d'autant plus faible que l'angle du bol est réduit. Cette force dépend aussi de l'intensité du champ centrifuge. Elle est maximale lorsque le sédiment sort de son anneau liquide. A cet endroit, la cohésion de la boue épaissie doit être préservée, sinon l'extraction se fait mal et il y a reflux de solides décantés vers la partie cylindrique, avec chute importante du rendement de séparation.

Cette force de reflux peut être réduite en diminuant la vitesse du bol (ou **vitesse absolue** V_A) mais un compromis est à trouver car c'est alors au détriment de la siccité (figure 75).

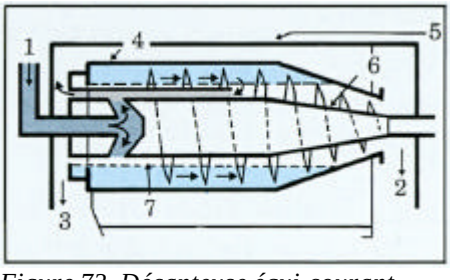


Figure 73. Décanteuse équi-courant.

1. *- Alimentation boue.*
2. *- Sortie sédiment*
3. *- Sortie liquide clarifié.*
4. *- Bol.*

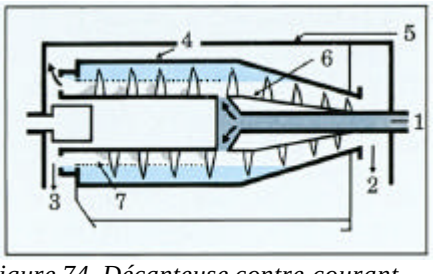
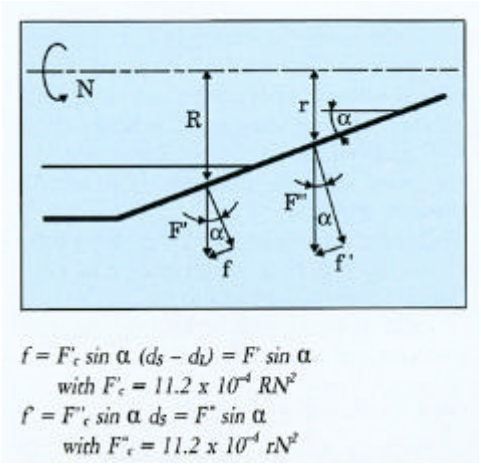


Figure 74. Décanteuse contre-courant.

5. - Capotage.
6. - Racleur hélicoïdal
7. - Anneau liquide.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



$f = F'_c \sin \alpha\ (d_S - d_L) = F' \sin \alpha$
with $F'_c = 11.2 \times 10^{-4}\ RN^2$
$f' = F''_c \sin \alpha\ d_S = F'' \sin \alpha$
with $F''_c = 11.2 \times 10^{-4}\ rN^2$

Figure 75. Incidence de la conicité du bol et de la vitesse de rotation sur la force de reflux f

6.4.3. Autres paramètres (figure 76)

6.4.3.1. Diamètre du bol: D

Il caractérise les gammes de machines entre 0,15 et jusqu'à même 1,7 m de diamètre. Le débit traité Q dépend bien sûr de D, mais également du rapport LT/D. Des machines longues (LT/D plus grand que 3 ou 4) doivent permettre de garder les mêmes capacités hydrauliques avec des diamètres plus faibles tout en améliorant consommation d'énergie et accélération. C'est (ailleurs surtout la partie cylindrique qui est allongée (Lc/D supérieure à 2 voire 3).

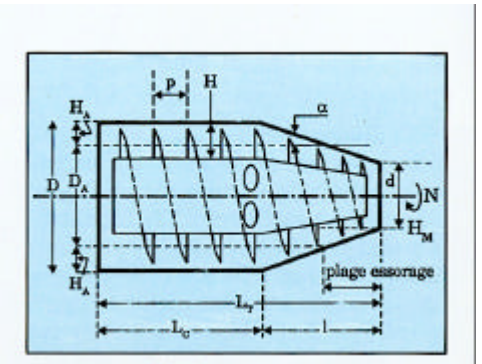
En traitement de boues pâteuses, la cohésion de la boue limite souvent cependant les performances.

6.4.3.2. Surface S de clarification à anneau liquide maximal

Ce paramètre important définit la surface de clarification maximale. Il est évalué comme suit

$S = p.D_A.L_c$ en m^2

Le rapport Q/S peut être utilisé pour le dimensionnement. Cependant, il ne prend pas en compte les turbulences hydrauliques internes au bol.



N : vitesse du bol,
D : diamètre du bol côté cylindrique,
d : diamètre sortie cône,
L_T : longueur totale,
L_c : longueur cylindrique (dite de clarification),
α : angle de conicité,
l : longueur conique,
H : hauteur filet entre vis et bol,
p : pas du racleur,
H_A : profondeur anneau liquide,
H_M : profondeur anneau à débordement,
D_A : diamètre interne anneau liquide.
Figure 76. Paramètres caractéristiques.

6.4.3.3. Facteur E (figure 77)

Il traduit la surface équivalente de décantation d'une centrifugeuse fonctionnant à 1000 g par rapport à une décantation simple. Un calcul simplifié de ce paramètre est :

$$\Sigma = \frac{2k\pi\omega^2.L_c}{g}\ (3/4\ R^2 + 1/4r^2)\ \text{en}\ m^2$$

Pour comparer les machines entre elles, E est calculé à la vitesse normale de fonctionnement N : $S_N = E.G.10^{-3}$.

SN sert en principe aux extrapolations de capacité hydraulique de machines de gammes différentes.

Cependant, il faut utiliser le paramètre SN avec prudence en cas de traitement de boues fluantes car il ne prend pas en compte les turbulences occasionnées par le racleur hélicoïdal ni celles liées à la sortie hors de l'anneau liquide

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.4.3.4. Flux hydraulique traversier

Ce flux caractérise bien les turbulences et énergies engendrées à travers la section de passage restreinte, située entre corps de vis et bol et perturbée par un racleur hélicoïdal à grande vitesse. Sur de nombreuses boues résiduaires conduisant à un sédiment difficile à compacter, le flux traversier minimal est souvent un paramètre capital.

- **La vitesse longitudinale VT** au travers de l'anneau liquide est définie par

$$V_T = \frac{Q}{S_A} \ m^3/m^2.h$$

Q = débit M3 h^{-1},

S_A= section transversale d'anneau liquide m^2.

Sur des boues très cohésives, il est souhaitable de ne pas dépasser 100 à 180 $m^3/m^2.h$.

. Le flux volumique FT dans l'anneau liquide est défini par

$$F_T = \frac{\hat{Q}}{V_c} \ m^3/m^3.h$$

V_c = volume de clarification, soit $S_A.L_C$ m^3.

De fortes valeurs de H (hauteur de filet) favorisent donc un transfert plus canne. Si la boue le permet, une augmentation du volume de clarification entraîne généralement l'obtention de débits supérieurs.

6.4.3.5. Temps de décantation: T

$$T = 3\,600 \times \frac{V_c}{Q} \text{ en secondes}$$

(Généralement entre 40 et 100 pour la majorité des applications).

6.4.3.6. Vis d'extraction

La hauteur du filet de vis ainsi que le pas de vis ont une influence certaine sur les capacités hydrauliques des machines. C'est l'organe le plus sensible aux abrasions et le filet de vis est généralement protégé: Stellite (48 - 50° Rockwell), carbure de tungstène pulvérisé (62 - 65° Rockwell), chromage ou encore tuiles de céramique ou de carbure de tungstène fritté. Pour certaines applications, la vis peut être à pas dégressif dans la partie conique pour compacter un peu plus le sédiment. Elle comporte aussi parfois des filets ajourés en zone cylindrique pour assurer des transferts moins turbulents.

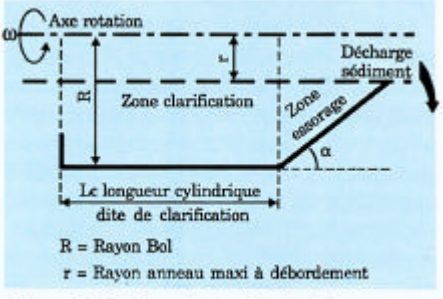


Figure 77. Détermination facteur Σ .

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7. FLUIDISATION

Cette technique est mise en oeuvre dans diverses unités de traitement de l'eau
- réacteurs biologiques en lit fluidisé,
- filtres et réacteurs biologiques à lit granulaire (lavage),
- sécheurs et fours en lit fluidisé.

Dans un réacteur, généralement biphasique contenant des particules solides au travers desquelles passe un fluide circulant du bas vers le haut, chaque particule est soumise d'une part à la force de gravité, et d'autre part, à la force de frottement due au passage du fluide. Il en résulte un équilibre définissant une vitesse limite: si la vitesse ascensionnelle du fluide est inférieure à cette vitesse limite, la particule a tendance à décanter, alors que si la
vitesse ascensionnelle du fluide est supérieure, la particule a tendance a être entraînée vers le haut par le liquide.

En fait, le "lit fluidisé" est constitué non pas seulement d'une particule, mais d'un ensemble de particules; de plus, toutes les particules n'ont pas la même taille. Pratiquement, lorsqu'on soumet dans une colonne une masse granulaire à des vitesses ascensionnelles croissantes, on obtient les résultats résumés sur le graphique de la figure 78. L'expansion du matériau croit en même temps que la vitesse ascensionnelle. Il en est de même pour la perte de charge, jusqu'à une certaine vitesse minimale de fluidisation V_{mf} Cette vitesse dépend aussi de la température.

A partir de cette valeur, la perte de charge reste constante. Pour un matériau dont le coefficient d'uniformité serait égal à 1, cette valeur est bien définie. Il n'en est pas de même pour les matériaux utilisés dans la pratique. Dans ce cas, on définit une V_{mf} qui est déterminée par l'intersection du prolongement des deux parties linéaires de la courbe (figure 78 a). A partir d'une vitesse V_f, le matériau est entraîné par le courant ascendant (figure 78 b).

En traitement biologique, afin de faciliter la fluidisation, on utilise des matériaux de faible taille effective, développant une grande surface spécifique. L'intérêt de cette grande surface est de permettre la fixation et le développement d'une masse bactérienne importante.
On peut ainsi obtenir une activité bactérienne volumique nettement plus importante que dans le cas de bactéries libres. Le développement des bactéries â la surface des grains conduit à la formation d'un filin d'autant plus actif que son épaisseur est faible. En outre, l'ensemble grain filin constitue une nouvelle particule dont la densité moyenne réelle est plus

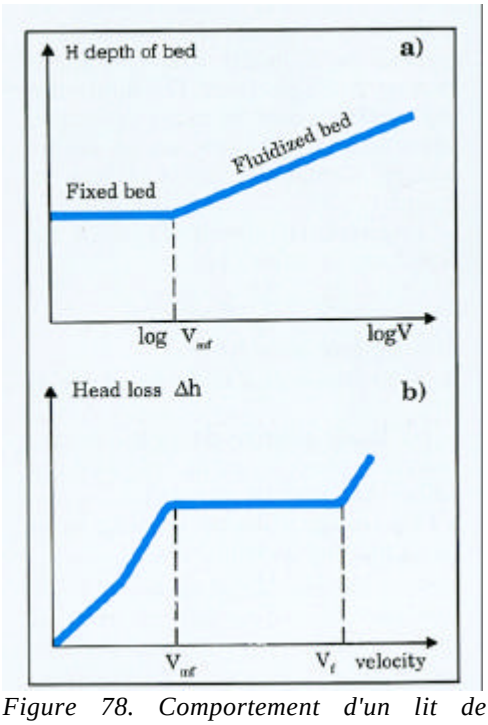


Figure 78. Comportement d'un lit de particules soumis à un courant ascensionnel.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

faible que la densité réelle de la particule d'origine: pour une même vitesse ascensionnelle, l'expansion du matériau croit avec l'augmentation de l'épaisseur du film.

Le bon fonctionnement d'un réacteur à lit fluidisé est conditionné par

- une bonne répartition du fluide à la base du réacteur,
- un matériau de contact homogène et résistant à l'abrasion,
- la mise en oeuvre d'un bon système de lavage, permettant d'éliminer les boues en excès en maintenant un ensemencement suffisant pour permettre le redémarrage du réacteur.

Les matériaux utilisables sont le sable, la pierre ponce, la BIOLITE, etc.

Le tableau 3 7 donne quelques valeurs de vitesse de fluidis ation pour les matériaux usuels

Tableau 37. Vitesses minimales de fluidisation pour différents matériaux filtrants (t = 20 °C).

Matériau	**Sable** (grains ronds)		**Anthracite** 1,4 - 2,5 mm		**Pierre ponce**	**Biolite L** 2,7 mm
	TEN 0,55	TEN 0,95	Traité thermiquement	Naturel		
TE, mm	0,53	0,95	1,62	1,16	1,38	2,58
V_{mf}, m.h-1	21	47	65	38	37	125

TEN :taille effective nominale, TE : taille effective mesurée

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

8. ÉLECTROLYSE

8.1. PRINCIPES DE BASE - DÉFINITIONS

L'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique (solution contenant des ions) crée un champ électrique orienté dans lequel les ions se mettent en mouvement: les cations se dirigent vers la cathode, les anions vers l'anode. Quand la tension appliquée est suffisante, les réactions suivantes se produisent aux interfaces électrolyte-électrodes

-à l'anode: oxydation avec émission d'électrons

$A^- \rightarrow A + e^-$

- à la cathode: réduction avec capture d'électrons $C^+ + e^- \rightarrow C$

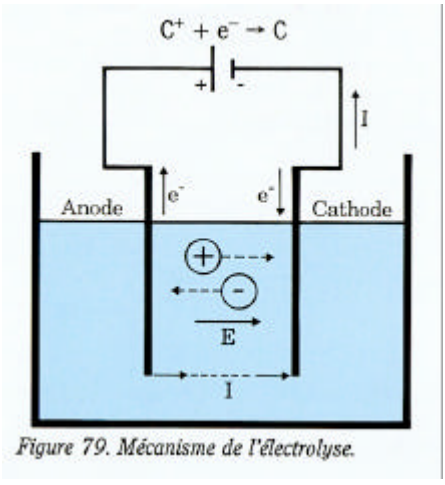


Figure 79. Mécanisme de l'électrolyse.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

8.1.1. Relation de Nernst

A l'abandon dans un électrolyte (sous courant nul), une électrode prend une tension Eo. Cette tension, qui correspond à un équilibre entre les espèces présentes, est appelée potentiel d'équilibre et suit la relation de Nernst

$$E_o = E_o^o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{Aox}{Ared}$$

avec:
E_o : potentiel d'équilibre de l'électrode,
E^0_0: potentiel d'équilibre de l'électrode dans les conditions standard (activités des espèces oxydantes et réductrices égales à l'unité),
R : constante molaire des gaz parfaits,
F : constante de Faraday,
T: température absolue,
n : nombre d'électrons mis en jeu dans le processus électrochimique,
Aox : activité de l'espèce oxydante,
Ared : activité de l'espèce réductrice.

Les activités sont assimilables aux concentrations dans le cas de solutions idéales. Les potentiels E^0_0 et E_0 sont exprimés par rapport à une électrode de référence, généralement une électode normale à hydrogène (e.n.h.).

Le tableau 38 donne des valeurs du potentiel d'équilibre standard de quelques couples électrochimiques (à 25 °C par rapport à l'e.n.h.).

8.1.2. Tension d'électrolyse

En fonctionnement normal d'une cellule d'électrolyse, la tension V obéit à une loi de la forme

$V = (E_0 + ?)_{anode} - (E_0 + ?)_{cathode} + rI$ avec:
E_0 : potentiel d'équilibre des électrodes,
? : surtension d'électrodes,
rI : chute ohmique due à la résistivité de l'électrolyte.

8.1.3. Loi de Faraday

La loi de Faraday exprime la relation qui lie la quantité d'électricité traversant une cellule d'électrolyse à l'amplitude des réactions se produisant aux interfaces électrodes-électrolyte

$$P = R_F \frac{M}{n} \frac{It}{N.e_o}$$

avec:
P : masse de constituant mise en jeu au cours de la réaction (g),
R_F.: rendement de courant,
M : masse molaire du constituant (g),
It : quantité d'électricité traversant la cellule (C), '
n : nombre d'électrons-grammes échangés lors de la réaction,
N : nombre d'Avogadro = $6{,}02.10^{23}$ pour une mole,
E_0 : charge de l'électron = 1,6 10-19 C.

8.2. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

8.2.1. Électrochloration

L'électrochloration est une technique qui permet la production in situ d'une solution diluée d'hypochlorite de sodium à partir d'une solution de chlorure de sodium (eau de mer ou saumure).

8.2.1.1. Réactions

La formation d'hypochlorite à partir de chlorure peut se résumer suivant la réaction globale

$2\,NaCI + H_2O, \rightarrow NaClO + NaCI + H_2$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 38. Échelle de Nernst des potentiels normaux d'équilibre

Métal	Réactions à l'électrode	Potentiel d'équilibre (volts)
Magnésium	$Mg = Mg^{2+} + 2e^-$	- 2,34
Béryllium	$Be = Be^{2+} + 2e^-$	- 1,70
Aluminium	$Al = A1^{3+} + 3e^-$	- 1,67
Manganèse	$Mn = Mn^{2+} + 2e^-$	- 1,05
Zinc	$Zn = Zn^{2+} + 2e^-$	- 0,76
Chrome	$Cr = Cr^{3+} + 3e^-$	- 0,71
Fer	$Fe = Fe^{2+} + 2e^-$	- 0,44
Nickel	$Ni = Ni^{2+} + 2e^-$	- 0, 2 5
Plomb	$Pb = Pb^{2+} + 2e^-$	- 0,13
Hydrogène	$H2 = 2\,H^+ + 2e^-$	- 0,000 par convention
Cuivre	$CU = Cu^{2+} + 2e^-$	+ 0,34
Cuivre	$Cu = Cu^+ + e^-$	+ 0,52
Argent	$Ag = Ag^+ + e^-$	+ 0,80
Platine	$Pt = Pt^{2+} + 2e^-$	+ 1,20
Or	$Au = Au^{3+} + 3e^-$	+ 1,42

- **Réactions principales**

Électrochimiques

Cathode (reliée au pôle — du générateur) : $2\,H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + \boxed{2\,OH^-}$

Anode (reliée au pôle + du générateur) : $\boxed{Cl_2} + 2e^- \leftarrow 2\,Cl^-$

Chimiques

$$Cl_2 + 2\,OH^- \rightarrow ClO^- + Cl^- + H_2O$$
$$ClO^- + H_2O \rightleftarrows HClO + OH^-$$

- **Réactions parasites**

- Migration et oxydation des OH^- à l'anode: $20H^- \rightarrow 1/2\,O_2 + H_20 + 2^{e-}$
- Réduction de $C10^-$ à la cathode : $C10^- + 2H^+ + 2e^- \rightarrow Cl^- + H_2O$,
- Formation d'hydroxydes, principalement

$$Mg(OH)_2\ Mg^2 + 2OH^- \rightarrow \underline{Mg(OH)_2}$$

8.2.1.2. Domaines d'applications

L'hypochlorite de sodium a un fort pouvoir oxydant rémanent favorable à la destruction des matières organiques; il constitue un réactif de choix dans le traitement des eaux. Sa génération in situ selon le procédé d'électrochloration élimine les sujétions qu'entraînent, aux plans de la sécurité et de l'approvisionnement, les stockages de chlore.

L'électrochloration s'est donc développée principalement pour la protection des circuits de refroidissement des plateformes offshore, des centrales électriques ou usines alimentées en eau de mer, contre la prolifération des algues et des mollusques.

Les consommations énergétiques des unités industrielles se situent aux

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

rons de 4 kWh par kg d'équivalent chlore produit. Les concentrations des solutions d'hypochlorite produites varient généralement de 1 à 3 g équivalent-chlore par litre.

8.2.2. Électrocoagulation

Ce procédé électrochimique utilisé sur certaines eaux résiduaires réalise essentiellement une floculation selon les processus suivants

- création d'un champ électrique entre électrodes favorisant les rencontres entre charges présentes dans l'effluent,
- libération d'ions métalliques (Fe, Al) par dissolution d'anodes solubles, ions qui génèrent des hydroxydes favorables à la formation des flocs.

Les consommations d'énergie de ce procédé sont variables d'une application à l'autre, mais se situent souvent entre 2 et 4 kWh par m^3 traité.

8.2.3. Autres applications

- Electroflottation : voir page 176.
- Electrodialyse : voir page 219.
- Electroplastie :voir chapitre 26 - sous-chapitre 10.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

9. SÉPARATION PAR MEMBRANES

Les procédés de séparation et de concentration par membranes sont connus depuis une centaines d'années. II a fallu, toutefois, attendre les années 60 pour voir, avec le développement des membranes synthétiques, la concrétisation industrielle de ces techniques. Depuis les années 70, ces procédés de séparation ont connu un développement considérable quant aux

- nombre de membranes développées puis mises sur le marché,
- performances et donc potentiel d'applications industrielles aussi bien dans le traitement des eaux que celui d'autres fluides.

Au risque d'être simpliste, une classification de ces nouvelles membranes peut être présentée en se fondant, soit sur la séparation qu'elles sont capables d'assurer, soit sur leur structure. Elle est ici limitée aux membranes et procédés intéressant le traitement des solutions et suspensions aqueuses.

9:1. GÉNÉRALITÉS

Est appelé **membrane** tout matériau qui mis sous la forme de parois minces (0,05 mm à 2 mm) a la propriété d'opposer une résistance sélective au transfert des différents constituants d'un fluide et donc de permettre la séparation de certains des éléments (suspensions, solutés ou solvants) composant ce fluide.

9.1.1. Structure des membranes

Depuis l'introduction des premières membranes d'osmose inverse en acétate de cellulose, un grand nombre de membranes organiques (polymères) ou même minérales (obtenues par exemple par frittage de grains céramiques tel que $A1_20_3$, carbone, carbure de silicium, zircone) sont venues peu à peu s'ajouter à la liste. Elles peuvent être caractérisées par leur structure (figures 80 et 81).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

.

- **Membranes homogènes**

Percées de trous quasi-cylindriques, en général par une technique de bombardement suivi d'une attaque chimique (quelques membranes de microfiltration, ex. membranes Nuclépore).

- **Membranes asymétriques**

Préparées en une seule étape à partir du même matériau polymère mais dans lesquelles la couche permsélective est réduite à une "peau" très fine, ceci afin de limiter la résistance au transfert qui est proportionnelle à l'épaisseur de cette couche. Celle-ci s'appuie sur une couche à pores beaucoup plus lâches, mais plus épaisse dont le rôle est d'assurer de bonnes propriétés mécaniques à la membrane sans freiner le débit d'eau de façon significative. On peut encore améliorer artificiellement ces propriétés en "coulant" la membrane sur un support textile renforçant la couche lâche.

- **Membranes composites**

Apparues plus récemment, des techniques permettent de déposer un peau permsélective sur un support poreux préexistant, lui-même souvent asymétrique. Les deux matériaux associés étant normalement de nature différente, ceci permet d'utiliser au mieux les propriétés des deux matériaux, mécaniques pour l'un, sélectives pour l'autre.

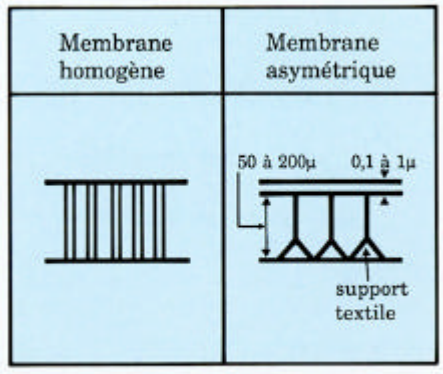


Figure 80. Structure des membranes homogène et asymétrique.

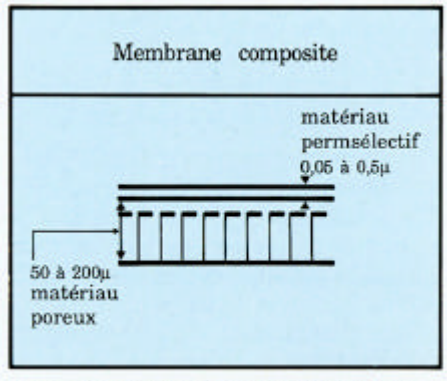


Figure 81. Structure de membrane composite.

9.1.2. Mécanismes de transfert au travers des membranes

Ils peuvent être classés en trois familles (figure 82). . Filtration

On utilise des membranes dites seraiperméables: la solution est concentrée par passage sélectif de l'eau (transfert "convectif du solvant dans le milieu poreux), alors que les autres composants.

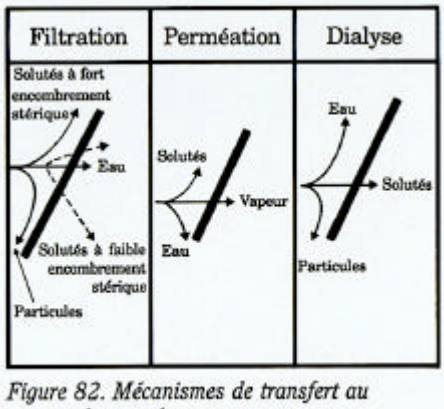


Figure 82. Mécanismes de transfert au travers des membranes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

du fluide sont plus ou moins arrêtés en surface du milieu poreux suivant leur taille. L'idéal est d'avoir une membrane qui n'est perméable qu'à l'eau (osmose parfaite).

- **Perméation**

Il est possible de fractionner un mélange par transfert sélectif d'un des constituants en phase gazeuse au travers de la membrane.

- **Dialyse**

Les membranes utilisées permettant le passage sélectif ou non des ions, l'eau ne traverse pas les membranes. Ces membranes peuvent être neutres ou chargées. Si elles sont chargées (matériau identique à celui des résines échangeuses d'ions, mis sous forme de feuille), elles deviennent sélectives du transport des ions de signes opposés et l'on peut ainsi constituer des membranes, cationiques ne transférant que les cations, ou anioniques ne transférant que les anions.

9.2. MEMBRANES SEMI-PERMÉABLES ET DE CLARIFICATION

Pour ces membranes, l'eau est la phase transférée préférentiellement, sous l'effet d'un gradient de pression. Elles sont la plupart du temps décrites comme membranes de filtration et classées en fonction de leur taille de pores (figure 83).

Cette classification très habituelle est toutefois prise en défaut

- il est difficile de caractériser correctement la taille de pores par les méthodes habituelles (points de bulle, porosimétrie mercure, microscopie optique, microscopie électronique), dès que l'on atteint le domaine de l'ultrafiltration et à fortiori de l'osmose,
- les mécanismes de transfert classiques de la filtration (transfert convectif de l'eau en milieu poreux et filtration/tamisage des particules d'une taille supérieure à celle des pores), qui s'appliquent bien à la microfiltration et à l'ultrafiltration, sont inadéquats dès que l'on aborde les membranes de nanofiltration et d'hyperfiltration appelée plus proprement osmose inverse.

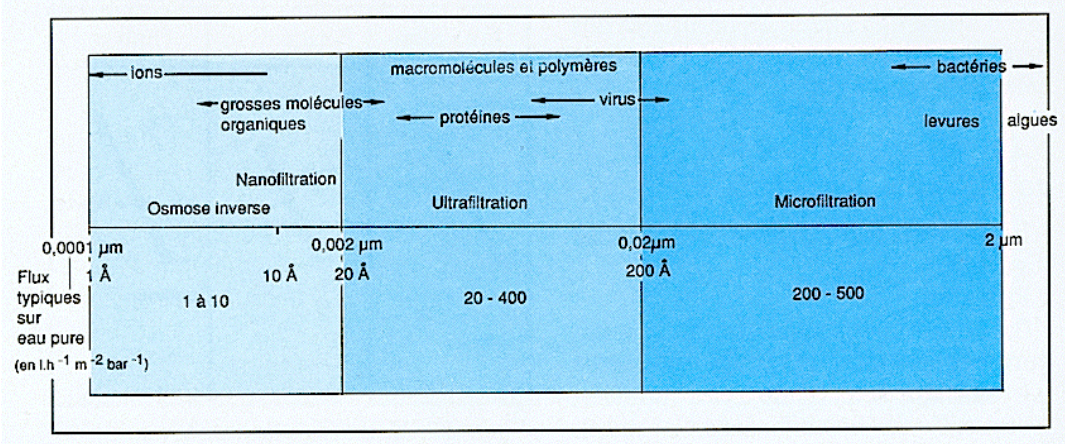


Figure 83. Types de filtration sur membrane.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

9.2.1. Osmose inverse (0.1.)

Elle utilise les propriétés de membranes semi-perméables à travers lesquelles l'eau migre, alors que tous les solutés sont rejetés, à l'exception de quelques molécules organiques très voisines de l'eau (faible masse molaire, polarité forte).

Si l'on sépare une solution saline concentrée d'une solution plus diluée par une telle membrane, la différence de potentiel chimique tend à faire passer l'eau du compartiment à bas potentiel vers celui à potentiel plus élevé pour diluer celui-ci (osmose directe). Si l'on veut empêcher cette diffusion, il faut exercer une pression sur le fluide "filtré". A l'équilibre, la différence de pression ainsi créée est appelée **pression osmotique du système** (figure 84).

Une équation simple relie pression osmotique et concentration: p= ?C.R.T.

p : pression osmotique en Pa.

?C: différence de concentration en

$$\text{mol.m}^{-3} = \frac{\text{concentration en kg.m}^{-3}}{\text{masse molaire en kg.mol.}^{-1}}$$

R : constante molaire des gaz parfaits = 8,314 J/mol.K).

T :température en K.

Exemple: concentration en solution 100 kg.m^{-3} ; T : 300 K ; composé de masse molaire 0,050 kg.mol^{-1}.

$$\Delta C = \frac{100}{0{,}050}$$

$$\pi = \frac{100}{0{,}050} \times 300 \times 8{,}314 = 50.10^5 \text{ Pa, soit 50 bars.}$$

De même pour un composé de masse molaire 0,5 kg.mol^{-1}, TT = 5 bars pour un composé de masse molaire 50 kg.mol^{-1}, TT = 0,05 bar

On constate que plus la molécule est petite (faible masse molaire) plus la pression osmotique créée par une même différence de concentration est élevée; ceci explique que l'ultrafiltration entraide une contre-pression osmotique bien plus faible que celle de l'osmose inverse.

Ceci est illustré par la figure 85 qui montre que la loi théorique n'est plus valable pour les concentrations les plus élevées.

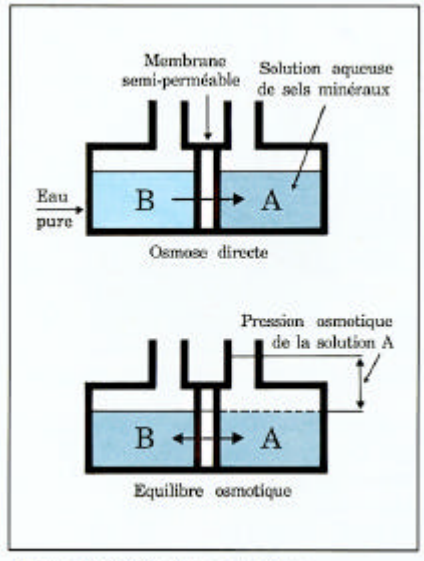


Figure 84. Phénomène osmotique.

En fait, pour produire de l'eau "pure" à partir d'une solution saline, il faut donc dépasser la pression osmotique de la solution et l'on peut même dire que pour obtenir des débits économiquement intéressants, il faut travailler au moins à deux fois la pression osmotique, soit pour une eau saumâtre contenant quelques grammes de sel par litre, des pressions allant de 5 à 30 bars et pour l'eau de mer des pressions allant de 50 à 80 bars.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

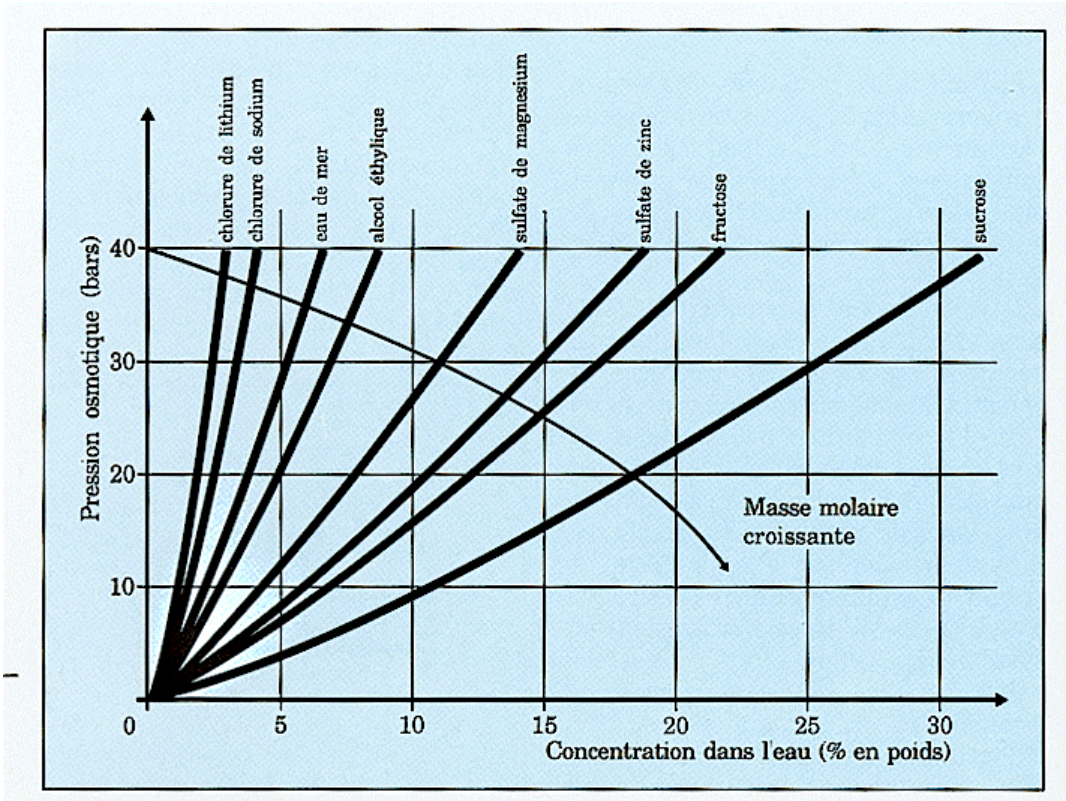


Figure 85. Pression osmotique de différentes solutions.

Un deuxième phénomène vient amplifier cet effet Comme l'illustre la figure 86, lors du transfert de l'eau, les molécules et ions retenus par la membrane ont tendance à s'accumuler le long de celle-ci et donc à augmenter la salinité réellement "traitée" par la membrane et donc la pression osmotique qui doit être "vaincue" pour dessaler la solution. Ceci se traduit par un coût énergétique plus élevé, mais aussi le risque d'entraîner des précipitations si le produit de solubilité d'un des couples cation anion présents est dépassé dans la couche limite le long de la membrane.

Ce phénomène est appelé **polarisation** de concentration de la membrane et caractérisé par le coefficient

$$\psi = \frac{C_m}{C_e}$$

avec:

C_m : concentration du liquide au contact de la membrane,

C_e : concentration du liquide à traiter.

Ce phénomène peut être minimisé par le balayage de la face amont de la membrane qui limite l'épaisseur de la couche limite et facilite la rétro-diffusion des solutés rejetés mais ceci revient à limiter la fraction d'eau dessalée; dans les systèmes industriels on cherche par cet artifice à maintenir le coefficient ? entre 1 et 1,4.

Pour décrire les phénomènes observés, les modèles les meilleurs font appel aux lois de la diffusion, l'eau pouvant être considérée comme dissoute par le polymère constitutif de la membrane (eau de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

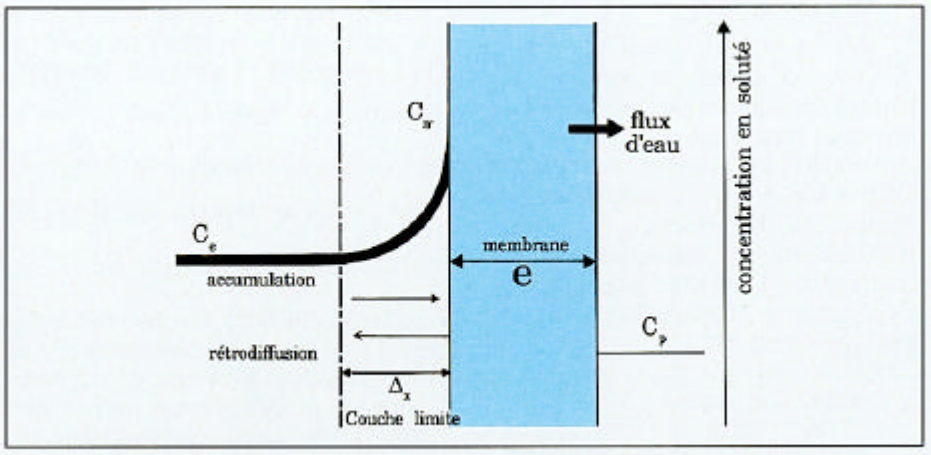


Figure 86. Polarisation de concentration.

.

gonflement du polymère), cette eau migrant sous l'effet du gradient de pression, alors que les sels ne migrent que sous le seul effet de leur gradient de concentration.

Pour une solution saline, les flux d'eau et de sel peuvent être obtenus à partir des lois de FICK et de HENRY. .

- **Pour l'eau**

$$Qp = Kp.\frac{S}{e}.(\Delta P - \Delta\pi).K_t$$

avec:

Qp : débit d'eau à travers les membranes.

Kp : coefficient de perméabilité à l'eau de la membrane.

S : surface de la membrane.

e : épaisseur de la membrane.

?P : différence de pression de part et d'autre de la membrane.

?p : différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane.

K_t :coefficient de température.

Le débit d'eau à travers la membrane est donc directement proportionnel au gradient de la pression effective, représentée par la différence entre la pression hydraulique et la pression osmotique.

Le coefficient K_t tient compte de la viscosité de l'eau. Celle-ci diminue quand la température augmente. Le débit est donc plus important quand la température s'élève (2,5 à 3% d'écart par degré autour de 15°C).

- **Pour les sels :**

$$Q_s = K_s.\frac{S}{e}.\Delta C.K_t$$

avec:

Q_S : débit de sel passant à travers la Membrane

K_S : coefficient de perméabilité de la membrane au soluté.

S : surface de la membrane.

e : épaisseur de la membrane.

?C : différence de concentration en ions, de part et d'autre de la membrane

C_m, - C_p ou C_e.? - C_p

K_t : coefficient de température.

Le débit de sel est directement proportionnel au gradient de concentration à travers la membrane et, pour une membrane et une solution donnée, sa valeur est indépendante de la pression appliquée.

La concentration en sels, dans le perméat, est donnée par le rapport des deux équations précédentes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Cette concentration est donc proportionnelle au gradient de concentration à travers la membrane, inversement proportionnelle au gradient de pression effective (?P - ?p), et indépendante de l'épaisseur de la membrane.

Par ailleurs, les équations ci-dessus montrent bien l'importance de ?, surtout si l'on observe que la polarisation augment également ?p.

Sur tout système d'OI on observe donc les tendances suivantes

	Débit perméat Q_p	**Salinité Perméat C_t**
Pression ↗	↗	↘
Température ↗	↗	=
Salinité ↗	↘	↗
? ↗	↘	↗

Dans la pratique, le système d'osmose le plus simple sera constitué des éléments suivants

- une pompe haute pression pour fournir l'énergie au système,
- un module ou ensemble de modules,
- une vanne sur le rejet permettant de maintenir la pression dans le système.

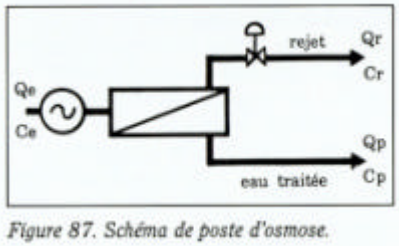


Figure 87. Schéma de poste d'osmose.

Un tel système est usuellement caractérisé par deux des variables suivantes si C_r est la concentration au rejet: **le taux de conversion** Y (%) défini par $Y = \frac{Q_p}{Q_e}$ ou le **facteur de concentration FC** défini par $FC = \frac{C_r}{C_e}$ et **le passage global de sel PS** (%) défini par $PS = 100\,\frac{C_p}{C_e}$.

- En fait, l'une, le PS dépend essentiellement du choix de la membrane et l'on verra au chapitre 15 où sont décrits membranes et modules commerciaux que ceux-ci ont des passages de sel allant de
0,5 à 15 % sur les ions monovalents
0,05 à 8 % sur les ions bivalents.
On note que ces valeurs sont assez faibles, aussi, souvent et en première approximation, on est amené à négliger C_P devant C_e ou C_r, ce qui simplifie les équations ci-dessus mentionnées.
- Les autres, Y ou FC, dépendent du choix fait par le projeteur d'utiliser plus ou moins d'eau brute. Ce choix est fondamental
- en effet, lorsque Y augmente, le coût énergétique par m^3 produit E croit puisque l'on a pressurisé moins d'eau pour une même production,
- mais en mémé temps FC augmente, puisqu'en utilisant l'approximation ci-dessus mentionnée le bilan sel donne

$$FC = \frac{1}{100 - Y}$$

Par ailleurs dans un même temps
- la qualité de l'eau produite C_P décroît puisque, d'une part la concentration moyenne devant la membrane croit en effet dans un module, cette concentration varie de C_e à l'entrée à C_r à la sortie, ce qui nécessite de remplacer les équations précédente C_e par

$$\frac{C_e + C_r}{2}$$

concentration moyenne dans le module.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- Q_p décroît ; en effet la pression osmotique

$$\frac{\psi C_r + C_r}{2}$$

p, proportionnelle à croît.

L'influence du choix de la conversion peut donc être résumé dans le tableau de conséquences ci-dessous

Si Y ↗ , alors $E_{(kw/m^3)}$ ↘ mais aussi Qp ↘ Cp ↗ FC ↗

Remarque: on verra au chapitre 15 les conséquences positives (moins de rejet à évacuer) mais souvent négatives (entartrage, salissure) qu'entraîne la croissance de FC.

9.2.2. Nanofiltration

Il s'agit d'une variante des membranes d'O.I. d'introduction assez récente caractérisée par :

- un passage des sels monovalents relativement élevé: 30 à 60 %,
- un passage des sels bivalents beaucoup plus faible: 5 à 15 %,
- un passage des solutés organiques du même type que les membranes d'osmose.

Le principal intérêt de ces membranes est donc, en tolérant un passage plus élevé des sels monovalents (qui contribuent le plus à la pression osmotique) de limiter ?p donc l'énergie à mettre en oeuvre pour

- un dessalement partiel associé à un bon adoucissement d'une eau pas trop saline (salinité < 2 $g.l^{-1}$),
- une purification "bon marché" des eaux vis-à-vis de leurs polluants organiques.

9.2.3. Ultrafiltration (U.F.)

Les membranes d'ultrafiltration, de structure plus lâche (asymétrique ou composite), ne permettent plus de rejeter que les solutés les plus grossiers (macromolécules) et a fortiori tous éléments particuliers tels que les virus et bactéries.

Elles sont communément caractérisées par leur **"point de coupure":** taille de la protéine de plus faible masse molaire rejetée par la membrane. On trouve ainsi des membranes industrielles à point de coupure allant de 2 10^3 à 10^5 daltons.

Cette notion n'est qu'indicative vu les variations de configuration stérique d'une même protéine en fonction de la salinité, du pH... a fortiori de deux macromolécules de poids moléculaire identique.

Les débits unitaires annoncés pour des membranes d'U.F. se situent entre 0,1 et 1 $m^3/h.m^2$.bar pour de l'eau propre mais diminuent considérablement en présence de colloïdes pour deux raisons essentielles: la polarisation de concentration et le colmatage.

Le premier phénomène a déjà été présenté dans le cas de l'osmose inverse, il est responsable en ultrafiltration de (apparition d'un flux limite lorsque la pression transmembranaire croît (figure 88).

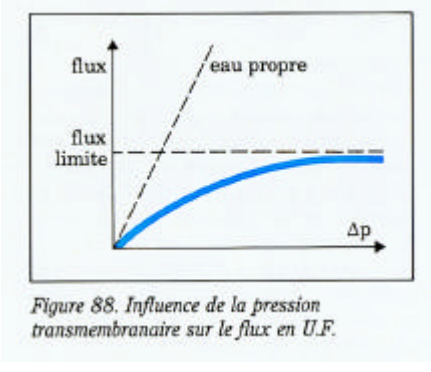


Figure 88. Influence de la pression transmembranaire sur le flux en U.F.

La surconcentration des solutés près de la membrane provoque en effet une augmentation sensible de la pression osmotique; la résistance au transfert de matière dans cette couche limite très concentrée (le coefficient de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

polarisation dépasse souvent 10^2) devient prépondérante. Les valeurs du flux sont souvent de l'ordre de quelques dizaines de litres par ni', soit 10 à 100 fois inférieures au flux avec eau propre.

Le seul moyen dont on dispose pour augmenter le flux est de travailler à plus forte vitesse tangentielle ce qui entraîne des consommations énergétiques importantes.

Le deuxième phénomène est le colmatage qui se traduit, à concentration constante, par une baisse du flux au cours du temps, pouvant aller jusqu'à un blocage complet de la membrane (figure 89).

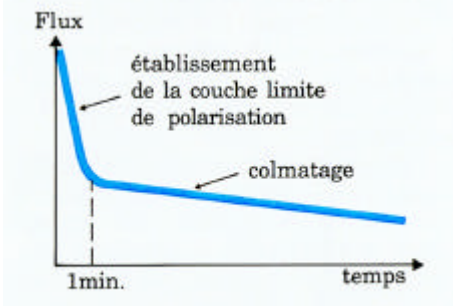


Figure 89. Evolution du flux avec le temps en U.F.

Le colmatage est dû à la formation d'un dépôt de colloïdes à la surface de la membrane mais aussi à l'adsorption de solutés variés et des colloïdes les plus fins dans les pores. Le premier phénomène est facilement réversible par rétro-lavage (décollement du gâteau et transfert) mais au contraire, le second est très souvent insensible au rétro-lavage, à une augmentation de vitesse de balayage, etc.; seul un traitement chimique approprié permet de "nettoyer" la membrane.

Ceci explique que la nature chimique de la membrane soit un critère important en ultrafiltration comme en microfiltration. Pour chaque application on choisit un matériau peu sensible à la fixation dessolutés à traiter et donc plus facilement décolmatable par voie hydraulique.

9.2.4. Microfiliration (M.F.)

Ces membranes n'altèrent plus du tout la composition de la solution; seuls les matières en suspension, colloïdes, bactéries ...sont rejetés (filtrés).

Dans ce cas, les phénomènes décrits ci-dessus comme conséquence du rejet des solutés (pression osmotique - concentration de polarisation) disparaissent et l'on retrouve à leur place les phénomènes déjà décrits de filtration sur milieux poreux peu épais: colmatage par accumulation d'un gâteau, ou colmatage interne aux pores.

Deux types de fonctionnement sont alors en concurrence

9.2.4.1. Filtration frontale ("dead end")

Dans ce cas (figure 90 a), l'eau est forcée de passer au travers de la membrane,
les particules retenues s'accumulent sous forme d'un gâteau de filtration dont l'épaisseur croît et la porosité décroît, conduisant à une réduction du débit spécifique dit de ".colmatage" de la membrane.

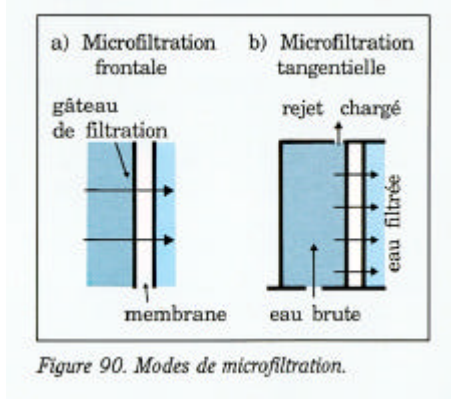


Figure 90. Modes de microfiltration.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans la plupart des applications
- membranes planes de microfiltration de laboratoire, (mesure des MES, de l'indice de colmatage FI...),
- cartouches de filtration sur membranes planes, plissées,...

ces éléments sont jetés une fois colmatés; plus rarement un mécanisme de lavage à contre-courant permet de les "régénérer".

9.2.4.2. Filtration tangentielle

Dans ce cas (figure 90 b), comme pour toutes les autres membranes semi-perméables, ces membranes sont agencées de manière à permettre un balayage de la face de travail par une partie du débit entrant qui limite ainsi l'accumulation du gâteau en entraînant de manière continue les matières rejetées à l'extérieur du système.

Ce mode continu estpréconisé sur la plupart des systèmes à membranes "régénérables". Il permet, en principe, d'éviter toute opération de colmatage ou lavage de membrane.

En fait, industriellement, les énergies à mettre en oeuvre sont trop élevées pour atteindre ce but et un compromis "énergie de balayage/fréquence de décolmatage" est à trouver (chapitre 15).

Ces membranes et leur technologie associée devraient permettre de remplacer les techniques de coagulation/floculation et séparation solide/liquide décrites au début de ce chapitre. Elles se développent aussi pour la filtration fine de différents produits comme
- acides ou solvants utilisés en microélectronique,
- filtration "stérilisante" des boissons (bières, jus de fruits, vins... ou de liquides dans les industries pharmaceutiques ou biotechnologiques.

9.3. PROCÉDÉS DE PERMÉATION

Parmi ceux-ci, on peut distinguer

9.3.1. Perméation gazeuse

Un mélange de gaz est appauvri ou enrichi en jouant sur les différences de vitesse de diffusion de ces constituants dans la matrice dense de la membrane sous l'effet d'un gradient de pression. Exemples
- récupération d'hydrogène dans un mélange d'hydrocarbures (figure 91 a industries pétrolières) ou dans les gaz de purges de la synthèse de l'ammoniac,
- enrichissement en azote ou en oxygène de l'air.

9.3.2. Pervaporation

Si l'on crée sur la face aval d'une membrane de pervaporation une dépression telle que l'on se trouve en-dessous de la tension de vapeur d'un des solutés de la solution en contact avec la face amont de la membrane, on observe un transfert sélectif de ces solutés sous forme gazeuse au travers de celle-ci. Une condensation de ce gaz permet la récupération éventuelle desdits solutés. Exemples
- déshydratation d'alcool: on peut ainsi récupérer un alcool absolu en transférant sélectivement au travers d'une membrane hydrophile la vapeur d'eau (figure 91 b).
- élimination des T.H.M. dans une eau potable: de la même manière, on peut faire diffuser sélectivement ces solvants

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

au travers d'une membrane silicone par exemple, et l'on a déjà pu montrer, à l'échelle pilote, que cette méthode pourrait être compétitive par rapport aux techniques actuelles de strippage et/ou d'adsorption sur charbon actif, si des modules à grande surface étaient produits industriellement.

9.3.3. Distillation sur membranes

En créant un vide partiel sur la face aval d'une membrane microporeuse, on peut créer un système qui

- s'oppose à la migration de la phase liquide appliquée sur sa face amont, à condition que la différence de pression au travers de la membrane reste inférieure à la pression capillaire au travers de celleci; en pratique, une porosité inférieure à 0,8 Nm sur des membranes hydrophobes permet d'appliquer des différences de pression de 1 bar,
- permet au contraire, le passage de vapeur d'eau au travers de la membrane. Cette vapeur, en se condensant, donne une eau de grande pureté; en effet, seuls d'autres composés volatils peuvent passer en même temps que l'eau.

Quelques systèmes industriels fonctionnent sur ce principe. Ils gardent toutefois le caractère énergivore des systèmes de distillation à un seul effet Par contre, le fait d'utiliser des membranes organiques permet d'éviter les phénomènes de corrosion rencontrés dans les évaporateurs.

Application possible: concentration d'effluents industriels (toxiques...) avant incinération ou cristallisation (figure 92)

.

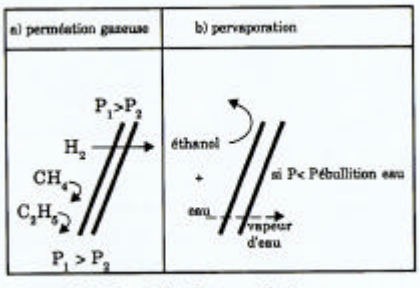


Figure 91. Procédés de perméation.

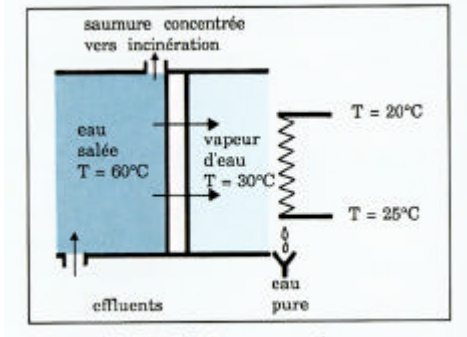


Figure 92. Distillation sur membranes.

9.4. MEMBRANES DE DIALYSE

La migration des solutés au travers de la membrane peut être obtenue par gradient de pression, gradient de potentiel chimique ou gradient de potentiel électrique.

9.4.1. Plézodialyse (gradient de pression)

Pas d'application industrielle.

9.4.2. Dialyse simple (gradient de potentiel chimique)

Les impuretés migrent pour égaliser le potentiel chimique (sels et solutés organiques de faible masse molaire) sur les

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

deux faces de la membrane; si l'on renouvelle suffisamment la phase en cours de concentration, on peut obtenir une élimination quasi totale des impuretés.

La principale application est l'hémodialyse (figure 93 - rein artificiel) qui permet d'épurer le sang (élimination des sels, urée, ...) des déficients rénaux, en le mettant en contact via une membrane de dialyse avec un plasma qui contient les

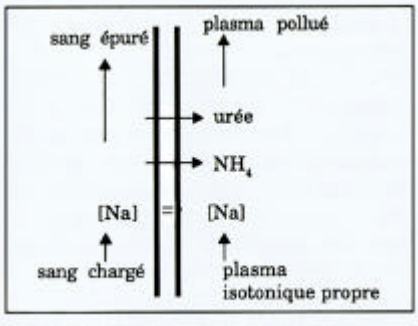


Figure 93. Principe de l'hémodialyse.

solutés qui doivent rester dans le sang, mais non ceux qui doivent être éliminés.

*9.4.3. Électrodialyse (*gradient de champ électrique)

- **Principe**

Si un liquide riche en ions est soumis à un champ électrique grâce à deux électrodes entre lesquelles on applique une différence de potentiel continue, les cations vont se diriger vers l'électrode négative (ou cathode) tandis que les anions vont se diriger vers l'électrode positive (ou anode). Si rien ne s'oppose à leur mouvement, ils viennent se décharger sur les électrodes de signe contraire, il y a électrolyse.

En revanche, si l'on place entre les électrodes un ensemble de membranes de dialyse sélectives
- les unes, cationiques, perméables aux cations seulement,
- les autres, anioniques, perméables aux seuls anions,

disposées alternativement comme l'indi-

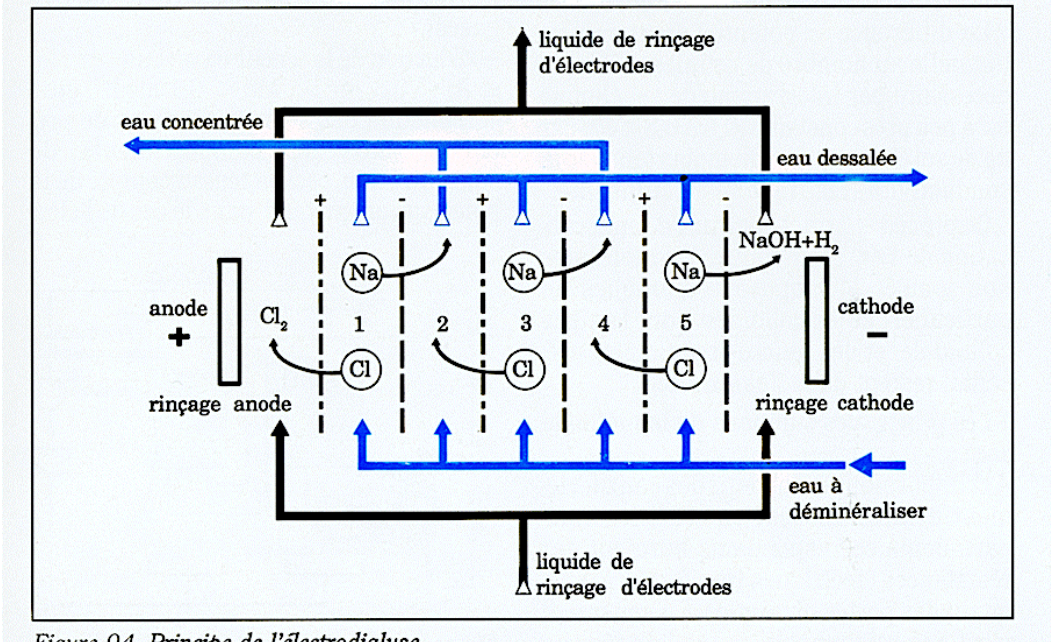


Figure 94. Principe de l'électrodialyse.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

que la figure 94, on limite la migration des ions, car les anions ne peuvent traverser les membranes négatives, ni les cations les membranes positives.

Ainsi, dans le cas de la cellule du schéma comportant trois paires de membranes, dont les compartiment 1, 2, 3, 4 et 5 sont alimentés par une solution de chlorure de sodium, les ions des compartiments 1, 3 et 5 passent dans les compartiments 2 et 4, sous l'effet du champ électrique créé par les électrodes.

Il est facile de voir que dans ces conditions l'eau des compartiments 1, 3 et 5 s'appauvrit en sel ("se déminéralise"), tandis que celle des compartiments 2 et 4 se concentre.

Pour chaque coulomb apporté au système, on observe donc la sortie d'une
Valence-gramme d'anions et de cations de chaque compartiment de déminéralisation (1, 3, 5), valence-gramme qui vient s'ajouter à celles déjà présentes dans les compartiments de concentration (2, 4).

La différence de potentiel étant proportionnelle au nombre de cellules, l'énergie nécessaire par kilogramme de sel éliminé est à peu près constante (0,6 à 0,8 kWh par kg de sel éliminé), ceci du moins tant que la conductivité électrique reste suffisante.

Ce procédé permet donc une déminéralisation de l'eau. Par contre, les molécules non ionisées (composés organiques en particulier) et les colloïdes, dont la silice colloïdale et les micro-organismes présents, restent dans l'eau traitée.

Les principales **sujétions de la méthode** sont:

A) l'impossibilité d'obtenir des eaux fortement déminéralisées: en effet, les compartiments correspondants auraient des résistances électriques trop fortes, provoquant des pertes ohmiques. En général, il n'est pas raisonnable de vouloir réduire la salinité de l'eau produite à moins de 300 $mg.l^{-1}$,

B) un coût de l'eau croissant rapidement avec la salinité entrante; en effet
- d'une part, comme on l'a déjà vu, la puissance consommée est proportionnelle à la quantité de sels éliminée,
- d'autre part, si l'on veut éviter des pertes de sélectivité dues à des rétro-diffusions d'ions sous l'effet d'un gradient chimique trop élevé entre les deux faces de la membrane, il faut limiter ce gradient de concentration.

Suivant l'hydraulique interne des électrodialyseurs (turbulences le long des membranes) on obtient au mieux un rendement d'élimination des sels de 40 à 66 % par passe (passage de sel compris entre 60 et 34%). Une organisation en plusieurs passes s'impose donc la plupart du temps (voir figure 95).

C) la nécessité de prétraitements
- élimination de la turbidité (pour éviter les dépôts surtout dans les zones mal irriguées),
- réduction de la teneur en métaux, ex.: Fe et Al < 0,3 $mg.l^{-1}$, Mn < 0,1 $mg.l^{-1}$, etc.
- réduction des sels susceptibles de précipiter dans les compartiments de concentration, ceci en tenant compte de la polarisation qui tend, dans le cas de l'élec

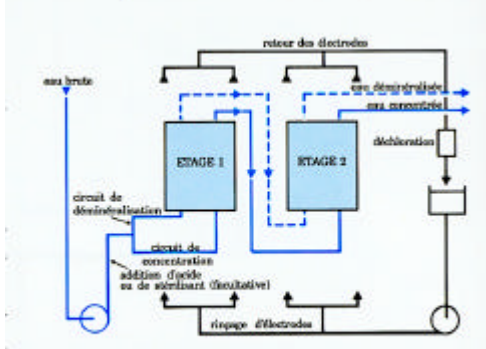


Figure 95. Électrodialyse à deux étages.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

trodialyse, non seulement à surconcentrer les ions de l'eau à traiter, mais également à changer le pH (surconcentration locale en ions OH^- ou H^+, ce qui peut renforcer la tendance à la précipitation de certains composés,

D) des limitations d'emploi: les membranes, de même nature chimique que les résines échangeuses d'ions, ont les mêmes limitations que. Celles-ci (voir page 235)

en particulier sensibilité aux oxydants (Cl_2 < 0,1 $mg.l^{-1}$), et surtout risques d'empoisonnement irréversible des membranes anioniques, si l'eau à traiter contient des macro-molécules organiques susceptibles de s'adsorber sur les membranes.

- **Électrodialyse à inversion de polarité ("EDR")**

Une solution élégante consiste, pour éviter les risques d'entartrage, à inverser régulièrement la polarité des électrodes (par exemple 5 min toutes les 30 à 60 min, et permuter ainsi instantanément compartiments de concentration et compartiments de dessalement et donc la position des couches de polarisation qui changent de côté de la membrane. L'eau "produite" pendant ces phases doit donc être rejetée.

Cette technique est prévue sur tous les postes d'électrodialyse modernes, car elle permet de simplifier le prétraitement au prix, il est vrai, d'une complication significative de l'installation

- vannes automatiques pour permettre l'évacuation à l'égout lors des phases d'inversion,
- électrodes devant toutes résister à la corrosion anodique.

Le principal **domaine de l'électrodialyse** est la production d'eau potable à partir d'eau saumâtre peu minéralisée (0,8 à 2 $g.l^{-1}$), domaine où elle reste en concurrence avec l'osmose inverse. Elle trouve, en outre, une application intéressante dans le dessalement de solutions colloïdales ou organiques (déminéralisation de petit lait par exemple). Dans ce domaine, elle n'est en concurrence qu'avec les échangeurs d'ions. En effet, l'emploi de l'osmose inverse provoquerait dans un tel cas la concentration concomitante de toutes les espèces présentes et produirait de l'eau déminéralisée, alors que l'électrodialyse n'élimine que les espèces ionisées.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

10. ADSORPTION

10.1. MÉCANISME

L'adsorption définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des molécules (gaz, ions métalliques, molécules organiques, etc.) d'une manière plus ou moins réversible. Il y a transfert de matière de la phase aqueuse ou gazeuse vers la surface solide. Le solide acquiert alors des propriétés superficielles (hydrophobie ou hydrophilie) susceptibles de modifier l'état d'équilibre du milieu (dispersion, floculation).

La capacité d'adsorption du solide dépend:

- de la surface développée **ou surface spécifique** du matériau. Les solides dans les milieux naturels (argiles, silice...) possèdent des surfaces spécifiques variables avec l'état physicochimique du milieu aqueux (pH, nature des cations liés, saturation de la surface par les molécules organiques...). Ainsi certaines argiles

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

comme les bentonites (Montmorillonite par exemple) ont une surface, accessible à la plupart des molécules, variant de 40 à 800 $m^2.g^{-1}$.. Leur capacité d'adsorption est très variable mais constitue le paramètre essentiel de la régulation des échanges et de la mobilité des éléments dans le milieu naturel.
Les adsorbants industriels (essentiellement les charbons actifs) développent des surfaces spécifiques énormes (600 à environ 1200 $m^2.g^{-1}$ caractéristiques d'une très forte microporosité. D'autres adsorbants comme les hydroxydes métalliques formés au cours de la coagulation-floculation développent eux aussi de très grandes surfaces dont l'extension est étroitement dépendante du pH;

- de la **nature de la liaison adsorbat-adsorbant,** c'est-à-dire de l'énergie libre d'intéraction G entre les sites d'adsorption et la partie de la molécule en contact avec la surface. Cette énergie est directement mesurable dans le cas de l'adsorption des gaz. Par contre, en milieu aqueux, les techniques calorimétriques n'enregistrent que l'enthalpie différentielle d'adsorption correspondant à la différence des énergies d'adsorption des molécules adsorbées et de désorption de l'eau liée à l'interface;
- du **temps de contact** entre le solide et les solutés. A l'équilibre il y a échange dynamique entre les molécules de la phase adsorbée et celles restant en solution. De nombreuses théories onttenté de modéliser la relation existant entre la quantité de molécules adsorbées ($g.g^{-1}$ ou $g.m^{-2}$) et la quantité à l'équilibre. Une des plus employées dans le domaine de l'adsorption sur les charbons actifs est la loi de FREUNDLICH qui établit

$X/m = C_e^{1/n}K$ (cf. figure 96)

où:

- X/m est la masse fixée par unité de masse d'adsorbant,
- C_e la concentration à l'équilibre dans la phase aqueuse des molécules de polluants,
- K et n sont des constantes énergétiques fonction du couple adsorbat/adsorbant pour une température donnée maintenue constante pendant l'expérience (isotherme). En fait, aucune modélisation, si "complexe" soit-elle, ne permet de couvrir l'ensemble de l'isotherme et encore moins d'expliquer les mécanismes de l'adsorption. Cela pour la raison essentielle que toute surface est physiquement et énergétiquement hétérogène.

Pour l'essentiel, les forces attractives de VAN DER WAALS et les forces attractives électrostatiques (COULOMB) sont à l'origine de l'adsorption. Par exemple, on observe une forte affinité des molécules aromatiques pour la structure graphitique du charbon et une répulsion des molécules polaires non aromatiques.

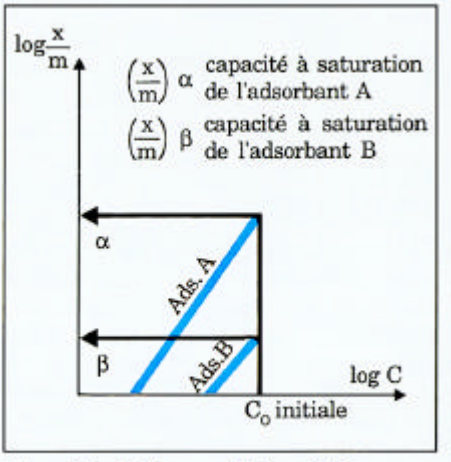


Figure 96. Isothermes de Freundlich.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

10.2. PRINCIPAUX ADSORBANTS

10.2.1. Charbon actif

L'expérience montre que les charbons actifs sont des adsorbants à très large spectre: la plupart des molécules organiques se fixent à leur surface, les plus mal retenues étant les molécules les plus polaires et celles linéaires de très faible masse molaire (alcools simples, premiers acides organiques...). Les molécules **peu polaires** génératrices de goût et d'odeur, les molécules à **relativement haute masse molaire** sont, pour des raisons différentes, bien adsorbées sur les charbons.

Outre ces propriétés adsorbantes, les charbons actifs sont également des supports de bactéries capable de dégrader une fraction de la phase adsorbée. Ainsi une partie du support est continuellement régénérée et susceptible de libérer des sites permettant de fixer de nouvelles molécules.

10.2.1.1. Principales applications

Les charbons actifs sont employés

- **en traitement d'affinage** des eaux potables ou des eaux industrielles de haute pureté; le charbon actif fixe alors les composés organiques dissous qui ont échappé à la dégradation biologique naturelle (auto-épuration des cours d'eau)

micropolluants, substances déterminant le goût et la saveur de l'eau; il adsorbe également certains métaux lourds à l'état de traces,

- **en traitement d'eaux résiduaires industrielles,** lorsque l'effluent n'est pas biodégradable ou lorsqu'il contient des éléments toxiques organiques interdisant l'emploi de techniques biologiques. Dans ce cas l'emploi de charbon actif permet souvent de retenir sélectivement des éléments toxiques et, par suite, de retrouver un effluent normalement biodégradable,
- **en traitement "tertiaire"** des eaux résiduaires ou industrielles. Le charbon fixe les composés organiques dissous, réfractaires au traitement biologique situé en amont, et permet ainsi d'éliminer une grande proportion de la DCO résiduelle.

10.2.1.2. Action catalytique

Une propriété des charbons actifs est leur **action catalytique** et plus particulièrement celle qu'ils exercent sur la réaction d'oxydation de l'eau par le chlore

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow 2\ HCl + \frac{1}{2}\ O_2 \uparrow$$

On réalise ainsi la **déchloration** d'une eau ayant subi un traitement de chloration par excès. On caractérise cette action déchlorante par **la longueur de demi-déchloration** : c'est la hauteur de lit filtrant qui, à une vitesse donnée, provoque une diminution de moitié de la concentration de chlore dans l'eau (voir page 383). Le pH a une grande influence sur cette longueur. En pratique on utilise, suivant la température, la teneur en chlore libre et la tolérance admise sur le chlore résiduel, des charges volumiques allant de 5 à 15 volumes d'eau par volume de charbon actif et par heure.

Cette action catalytique existe aussi vis-a-vis des chloramines qui sont décomposées en azote et acide chlorhydrique. Toutefois, la cinétique est plus lente que dans le cas du chlore libre (longueur de demidéchloration beaucoup plus élevée); il faut donc diminuer nettement les charges volumiques si l'on veut obtenir des résultats comparables.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le pouvoir déchlorant d'un charbon est perturbé partout ce qui gêne le contact entre le charbon et l'eau à traiter : dépôts de carbonate de calcium, saturation de la surface par adsorption de polluants divers, etc.

10.2.2. Autres adsorbants

En plus des adsorbants naturels déjà mentionnés, de nouveaux adsorbants sont développés:

- **adsorbants minéraux:** les alumines et oxydes métalliques divers; bien que présentant pour certains des surfaces spécifiques importantes (300 à 400 $m^2 g^{-1}$) ces solides adsorbent plus sélectivement que les charbons. Leur capacité dépend étroitement du pH et de leur mésoporosité. En dessous du point isoélectrique, seules les molécules chargées négativement sont adsorbées sur les sites positifs. Dans l'état actuel de leur développement ils ne peuvent être compétitifs vis-à-vis du charbon actif. Cependant, certains de ces solides, comme les alumines ou les oxyhydroxydes ferriques, présentent un réel intérêt pour l'élimination du fluor, des phosphates, des nitrates...,
- **adsorbants organiques:** résines macromoléculaires à surfaces spécifiques comprises entre 300 à 750 $m^2.g^{-1}$; leurs capacités sont très médiocres par rapport à celles des charbons actifs, par contre, ces résines ont une meilleure cinétique d'adsorption (utilisation entre 5 et 10 vol./vol.h) et sont souvent plus faciles à régénérer (énergie de liaison faible).

On peut également mentionner les "scavengers", résines anioniques à forte porosité (voir page 239). Toutefois, ces résines ont une moindre surface spécifique et doivent en partie leur activité vis-à-vis des substances polaires (telles que: acides humiques, détergents anioniques), à leur charge ionique, ce qui les distingue des autres adsorbants

10.3. PRINCIPES DE MISE EN OEUVRE DES CHARBONS ACTIFS

Les charbons actifs sont disponibles sous deux formes: charbon en poudre et charbon en grains.

10.3.1. Charbon en poudre

Le charbon en poudre (CAP) se présente sous forme de particules de dimensions comprises entre 10 et 50 µm et est utilisé en général en combinaison avec les traitements de clarification. Introduit en continu dans l'eau avec les réactifs de floculation, il se trouve inséré dans les flocs et est ensuite extrait de l'eau avec eux.

Pour cette extraction, il est recommandé d'avoir recours à un décanteur à recirculation de boues (DENSADEG) ou à lit de boues (PULSATOR, SUPERPULSATOR). Ces appareils permettent d'augmenter notablement le temps de contact entre l'eau et le charbon et, par suite, de mieux s'approcher de l'équilibre. (C'est ainsi qu'on a pu, avec un résultat identique, réaliser une. économie de charbon de 15 à 40 % en utilisant un PULSATOR au lieu d'un décanteur statique.)

10.3.1.1. Avantages

- Les charbons actifs en poudre sont environ 2 à 3 fois moins chers que les charbons en grains.
- Leur surdosage est possible en cas de pointe de pollution.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- Leur emploi ne nécessite qu'un investissement réduit quand le traitement ne comporte qu'une étape de floculationdécantation (il suffit de prévoir un simple poste de dosage de charbon actif).
- Leur cinétique d'adsorption est rapide, une grande surface étant directement accessible.
- Le charbon actif favorise la décantation en alourdissant le floc.

10.3.1.2. Inconvénients

- Il est impossible de régénérer le charbon actif lorsqu'il est récupéré en mélange avec des boues d'hydroxydes
on est alors amené à travailler en charbon actif perdu.
- Il est difficile d'éliminer les dernières traces d'impuretés sans addition d'un excès de charbon actif.

Figure 97. Installation de la ville de Nantes. Débit : 11700 $m^3.h^{-1}$. Poste de dosage du CAP.

- Pour pouvoir utiliser le charbon lors des pointes de pollution, il est indispensable d'avoir détecté cette pointe de pollution.
- On utilise donc essentiellement le charbon en poudre à l'occasion de dosages discontinus ou de faible importance (inférieurs à environ 25 $g.m^{-3}$ suivant les cas).

10.3.2. Charbon en grains

10.3.2.1. Caractéristiques physiques des charbons en gains

Les caractéristiques physiques des charbons en grains (CAG) varient suivant les produits dans de grandes limites. (cf. tableau 39).

Tableau 39. Caractéristiques physiques des charbons actifs granulés.

Matière première	Tourbe, schistes bitumineux, anthracite, bois noix de coco
Présentation	Concassé, filé
Granulométrie TE mm	0,25 à 3
Cu	1,4 à 2,2
Friabilité750 coups	10 à 50%
1500 coups	20 à 100%
Densité apparente (tassée)	0 20 à 0,55
Surface spécifique $m^2.g^{-1}$	500 à 1300
Cendres%	4 à 12

La connaissance de ces paramètres est fondamentale pour le choix et la mise en oeuvre du charbon actif dans le cadre d'une application donnée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

10.3.2.2. Capacité utile d'un charbon

Le charbon en grains est utilisé sous forme de lit filtrant traversé par l'eau à traiter, dont les impuretés se trouvent ainsi soumises à une extraction méthodique; en effet, l'eau débarrassée progressivement de ses polluants rencontre des fractions de charbon actif de moins en moins saturées et donc de plus en plus actives.

L'économie d'un traitement sur charbon actif est essentiellement fonction de la capacité utile du charbon, exprimée en g de DCO fixée par kg de charbon actif, qui caractérise la "consommation de charbon" pour obtenir un effet déterminé. Or, pour un système donné, eau polluée-charbon, cette capacité est fonction

- de **la profondeur du lit**: plus un lit est profond, plus il tolère des fronts d'adsorption allongés sans fuite excessive (notions analogues à celle de l'échange d'ions, page 230) tout en assurant une parfaite saturation de la couche supérieure,
- de **la vitesse d'échange**: l'expérience montre que l'on peut rarement excéder 3 volumes d'eau par volume de charbon et par heure pour les cas de pollution élevée. Dans le cas du traitement des eaux de consommation, où les teneurs en produits adsorbables sont très faibles, l'optimum économique doit tenir compte du poids important des frais d'investissement et l'on est conduit à accepter une moindre saturation du charbon en utilisant des charges volumiques plus élevées: 5 à 10 vol./vol.h.

La théorie ne donnant que le sens de variation de ces lois, il reste indispensable de faire appel à l'expérience du spécialiste et d'effectuer des essais dynamiques sur des colonnes de taille suffisante pour permettre l'extrapolation.

Il existe des modèles qui permettent, à partir d'une expérience de laboratoire, de prévoir la capacité utile d'un charbon.

10.3.2.3. Fonctions d'un lit de charbon

Un lit compact remplit quatre fonctions

- **filtration:** cette fonction doit souvent être minimisée pour éviter le colmatage du lit, inévitable en l'absence de systèmes de lavage efficaces qui provoquent à chaque cycle un bouleversement important des couches. En outre, le charbon tend à extraire des flocs avec lesquels il est en contact, des produits adsorbables qui contribuent à sa saturation prématurée. On recommande souvent pour ces raisons une filtration préalable de l'eau sur sable;
- **support bactérien:** ce phénomène peut contribuer à l'épuration, mais il peut aussi être dangereux s'il n'est pas parfaitement maîtrisé (fermentation, odeurs, colmatage du lit..);
- **action catalytique** (pour mémoire);
- **adsorption** : cela doit rester le rôle essentiel du charbon.

Trois agencements sont possibles

- lits fixes simples: cette technique est largement utilisée dans les traitements de potabilisation (cf. filtres MÉDIAZUR, chapitre 13, § 3.2) ;

- lits fixes en série: on utilise plusieurs colonnes en série, régénérées par permutation... (figure 99). On organise ainsi un système d'extraction à contre-courant.

Le filtre MÉDIAZUR à double flux (cf. chapitre 13, § 4.2) en est une variante avec deux cellules.

- lits mobiles: ils fonctionnent ainsi à contre-courant (fig. 100). La base du lit peut être fluidisée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 98. Installation de Viry-Châtillon (Essonne) - LE. Débit: 4 000 $m^3.h^{-1}$. 6 filtres MÉDIAZUR T et 9 filtres MÉDIAZUR V

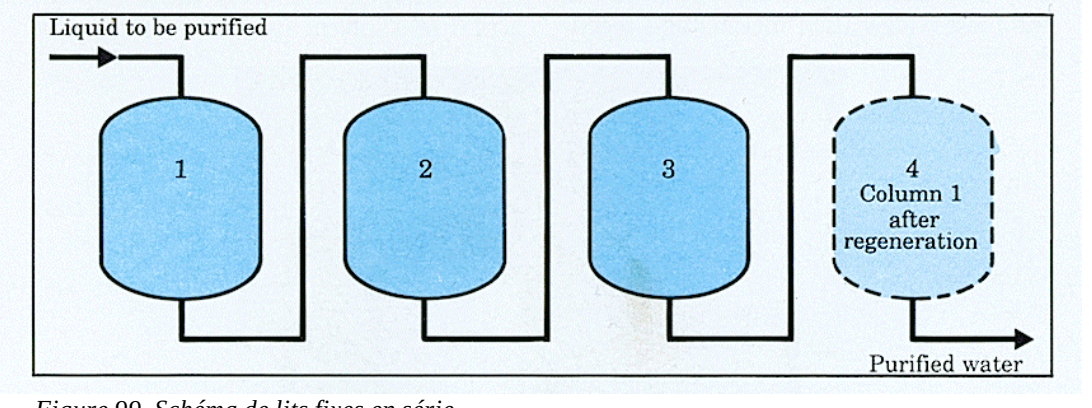


Figure 99. Schéma de lits fixes en série.

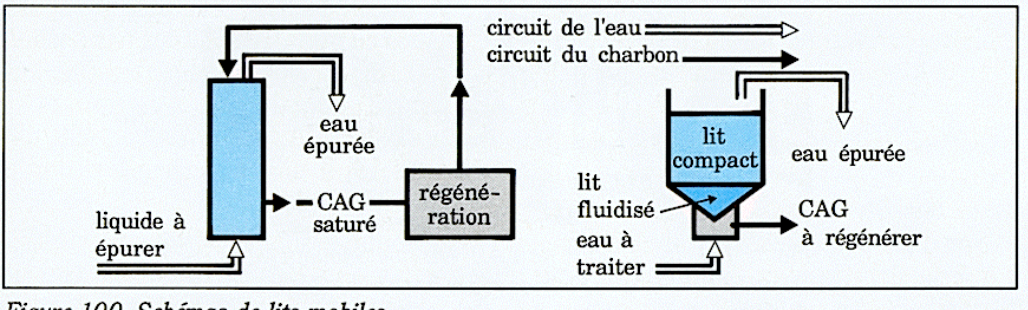


Figure 100. Schémas de lits mobiles.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

10.3.2.4. Régénération

Le charbon actif (de même que les adsorbants artificiels) est un produit coûteux. Il serait, la plupart du temps, prohibitif de remplacer le charbon saturé qu'il faut donc pouvoir régénérer; à cet effet, trois méthodes ont été développées

- **Régénération à la vapeur**: cette méthode est limitée à la régénération de charbon n'ayant fixé que quelques produits très volatils ; toutefois, l'application de vapeur peut être intéressante pour décolmater la surface des grains et stériliser le charbon.
- **Régénération thermique:** par pyrolyse et combustion des substances organiques adsorbées (figure 101). Le chauffage vers 800 °C sous atmosphère contrôlée évite d'enflammer le charbon. C'est la méthode la plus employée; elle permet de bien régénérer le charbon actif, mais a un double inconvénient

-elle nécessite des investissements lourds; on utilise selon les cas un four à soles étagées, un four à lit fluidisé ou un four tournant Le four doit comporter des dispositifs de contrôle d'atmosphère et de température, un système de déshydratation à l'entrée et une trempe du charbon à la sortie du four;

- elle conduit à des pertes de charbon élevées (7 à 10 % par régénération), c'est-à-dire qu'après 10 à 14 régénérations, on a statistiquement remplacé entièrement la masse de CAG.

L'utilisation de moyens de chauffage électrique (four à infrarouge, four à induction) permet de réduire ces pertes. Mais ces techniques, coûteuses, ne sont utilisées que pour la récupération de métaux onéreux.

- **Régénération chimique:**

DEGRÉMONT a développé un procédébasé sur l'action d'un solvant utilisé à une température

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 101. Installation de TAÏF (Arabie Saoudite). Débit 12 600 $m^3 j^{-1}$. Four de régénération du CAG. Capacité: 6 $t.j^{-1}$.

voisine de 100 °C, et à pH élevé. L'avantage de ce procédé est, pour un investissement équivalent, de n'entraîner que des pertes minimes en charbon actif (de l'ordre de 1 % de la masse traitée). Par contre l'utilisation de réactifs chimiques pour la régénération (réactif alcalin et solvant) conduit à la formation d'éluats d'où il faut récupérer le solvant par distillation. On détruit ensuite les polluants par incinération à moins qu'ils ne puissent être récupérés. Ce procédé est moins universel que la régénération thermique.

- **Régénération biologique:** ce mode de régénération n'a pas encore reçu d'application industrielle.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

11. ÉCHANGE D'IONS

11.1. GÉNÉRALITÉS

11.1.1. Principe

Les échangeurs d'ions sont des substances granulaires insolubles, comportant dans leur structure moléculaire des radicaux acides ou basiques susceptibles de permuter, sans modification apparente de leur aspect physique, et sans altération ou solubilisation, les ions positifs ou négatifs, fixés sur ces radicaux, contre des ions de même signe se trouvant en solution dans le liquide à leur contact. Cette permutation appelée échange d'ions permet de modifier la composition ionique du liquide objet du traitement, sans modification du nombre total de charges existant dans ce liquide avant l'échange.

Les échangeurs d'ions ont d'abord été des terres naturelles (zéolites), puis des composés synthétiques minéraux (silicoaluminates) et organiques, ces derniers étant presque exclusivement employés actuellement sous le nom de **résines.** Ce terme a été généralisé à tort pour désigner l'ensemble des échangeurs. Ils se présentent soit sous forme de grains, soit, pour la majorité d'entre eux, sous forme de billes.

On distingue deux catégories: les résines du type **gel** et celles du type **macroporeux** ou macroréticulé. Leur structure de base est identique; c'est une structure macromoléculaire qui est obtenue dans les deux cas par copolymérisation, par exemple de styrène et divinylbenzène. Leur différence réside dans la porosité. Un fort taux de réticulation accroît la résistance mécanique à la fois aux contraintes physiques (pression-dépression), et aux contraintes chimiques (changement d'état de saturation ionique).

Les résines de type **gel** ont une porosité naturelle, issue de la polymérisation, et limitée aux distances intermoléculaires. C'est une structure de type microporeux.

Les résines de type **macroporeux,** comportent de plus une porosité artificielle, obtenue par l'addition d'une substance porogène. On crée ainsi dans la matrice un réseau de canaux de grande taille appelés macropores. Ces produits présentent une meilleure capacité d'adsorption et de désorption des matières organiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La structure chimique des échangeurs est telle qu'ils comportent dans leur molécule un ou plusieurs radicaux à fonction acide ou basique. La présence de ces radicaux permet d'assimiler, pour la compréhension des phénomènes d'échange, un échangeur de cations à un acide de forme R-H, et un échangeur d'anions à une base de forme R-OH. La force de cet acide ou de cette base est fonction de la nature du noyau moléculaire et des radicaux qui y sont attachés, HCO_2, HSO_3, NH_3OH, etc. L'échangeur est dit monofonctionnel s'il n'existe qu'une seule variété de radicaux, par exemple HCO_2 ou HSO_3, et polyfonctionnel si la molécule comporte simultanément des radicaux de nature, et, par conséquent, de forces ioniques différentes, par exemple

HCO_2 \
R \
HSO_3

11.1.2. Mécanisme de l'échange d'ions

11.1.2.1. Mise en oeuvre d'une réaction réversible du type adoucissement:

$$R\text{-}Na_2 + Ca^{2+} \rightleftarrows R\text{-}Ca + 2\ Na^+$$

Comme tout équilibre chimique, il est réglé par la loi d'action de masse, la réaction inverse correspondant à la régénération de l'échangeur.

Si le liquide à traiter est mis en contact statique avec l'échangeur, la réaction s'arrête lorsque l'équilibre est atteint entre le liquide et la résine.

Pour obtenir une permutation suffisamment poussée, il faut donc travailler par équilibres successifs à travers des couches superposées d'échangeurs et fonctionner par percolation, mais il subsiste pratiquement toujours une **fuite ionique** plus ou moins importante de l'ion que l'on souhaite fixer.

Lois régissant un échange d'ions réversible: pour chaque réaction mettant en présence deux ions A et B, il peut être donné une représentation graphique de l'équilibre entre les concentrations respectives de A et de B dans le liquide et dans l'échangeur d'ions (figure 102).

A l'équilibre, on voit que pour une concentration de B égale à X % dans la solution, l'échangeur se sature jusqu'à une concentration de Y%. Lorsque les deux ions A et B ont la même affinité pour l'échangeur, la courbe d'équilibre correspond à la diagonale du carré. Plus la préférence de l'échangeur pour l'ion B est marquée, plus la courbe se déplace dans le sens des flèches.

L'allure de la courbe, pour un système donné de deux ions, dépend d'un grand nombre de facteurs: nature et valence des ions, concentration des ions dans le liquide, nature de l'échangeur. C'est ainsi que dans un système $Ca^{2+} \rightleftarrows 2\ Na^+$ appliqué à une résine polystyrène sulfonée, l'affinité de l'échangeur est toujours

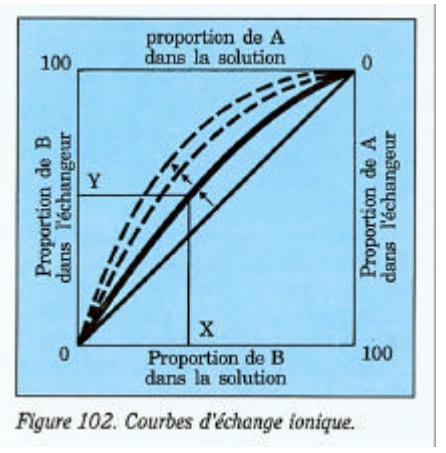


Figure 102. Courbes d'échange ionique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

plus grande pour le calcium que pour le sodium, et ceci d'autant plus que la solution est plus diluée.

Ainsi qu'il est dit plus haut, la seule mise en contact en cuvée de l'échangeur -et du liquide aboutirait à un point de la courbe et s'y stabiliserait.

Si l'on désire traiter jusqu'à élimination poussée d'un ion au profit d'un autre, il faut donc déplacer progressivement l'équilibre en faisant traverser par le liquide une série de couches successives d'échangeur contenant de moins en moins d'ions à fixer, de façon à parcourir la courbe d'équilibre jusqu'au voisinage du zéro de concentration de l'ion indésirable.

Si l'on part d'une couche d'échangeur placée totalement sous la forme A et si on la fait traverser par un liquide chargé d'ions B, les équilibres successifs entre A et B aboutissent à une série de courbes isochrones de concentration qu'on peut représenter par la figure 103 a pour deux ions d'affinité similaire, et par la figure 103 b pour le cas où l'échangeur présente pour l'ion B' une affinité beaucoup plus grande que pour l'ion A'. Le "point de fuite" est atteint lorsque la coube isochrone abandonne l'axe vertical de droite (concentration de B positive dans la courbe de sortie du liquide). A ce moment, ces courbes sont représentées par la figure 103 c.

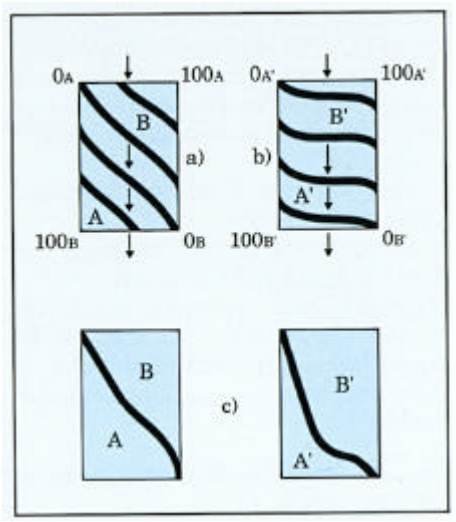


Figure 103. Déplacement des courbes isochrones.

Si l'aire $\frac{B}{A+B}$ représente la fraction de la capacité totale de l'échangeur mobilisée par celui-ci au moment de l'apparition de la fuite, on voit que cette fraction est beaucoup plus grande dans le cas de B' que dans le cas de B.

Ceci se matérialise également dans le liquide traité par l'allure des "courbes de saturation" (figure 104).

L'allure de ces courbes dépend non seulement de la courbe d'équilibre statique évoquée plus haut, mais également de la "cinétique d'échange" entre le liquide et l'échangeur, cinétique qui fait intervenir la pénétration des solutés dans l'échangeur, régie par des lois dites "équilibres de Donnan"

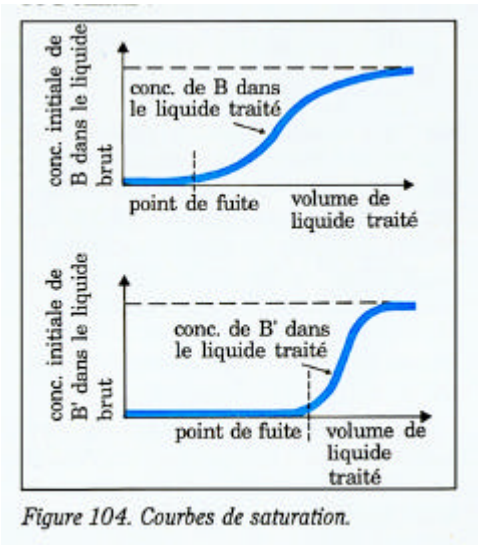


Figure 104. Courbes de saturation.

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ces phénomènes sont très complexes; ils intéressent à la fois le degré de dissociation et la concentration des ions, la température, la nature de l'interface échangeur liquide et la cinétique de pénétration à l'intérieur du solide qui constitue cet échangeur.

La capacité totale d'un échangeur, c'est-à-dire le nombre total d'équivalents disponibles pour l'échange par litre d'échangeur, n'a qu'une valeur pratique toute relative, le facteur industriel à prendre en considération étant la "capacité utile" définie à partir des graphiques isochrones ou des courbes de saturation décrits plus haut.

Un autre point important dans les applications industrielles découle directement de l'examen de ces divers graphiques

Étant donné l'existence d'une courbe d'équilibre échangeur liquide, la qualité du liquide traité par une couche d'échangeur dépend de la **qualité de la dernière couche traversée par ce liquide, quelles** que soient les qualités des couches précédentes.

Considérant une réaction réversible du type

$$R - A + B \rightleftarrows R - B + A$$

qui représente la "fixation" de gauche à droite et la "régénération" de droite à gauche, il y a lieu d'examiner l'état de l'échangeur au début d'un cycle de fixation succédant à un cycle de régénération. On voit aisément qu'au début du cycle de fixation, la qualité de l'eau traitée, caractérisée par la fuite ionique, dépend essentiellement du degré de régénération de la couche de sortie de l'échangeur.

Ces notions doivent toujours être présentes à l'esprit lorsque sont examinées les différentes qualités d'échangeurs et leurs application industrielles.

11.1.2.2. Mise en oeuvre d'une réaction non réversible

C'est le cas de la fixation d'un acide fort par un échangeur d'anions fortement basique

$$HCl + R\text{-}OH \rightarrow R\text{-}Cl + H_2O$$

La réaction inverse (hydrolyse) n'existe pratiquement pas, l'échange est total et peut être obtenu aussi bien au contact statique qu'en percolation. Dans ce cas, la fuite ionique peut être nulle, à condition que le temps de contact entre l'eau et la résine soit suffisant.

On peut assimiler à cette catégorie d'échange les réactions d'équilibre qui donnent naissance à un composé insoluble. Par exemple, si l'on traite de l'eau de mer avec un échangeur saturé d'ions argent, on obtient

$$R - Ag + NaCl \rightarrow R - Na + AgCl$$

AgCl insoluble, précipite. Dans ces conditions, d'après les lois de Berthollet, l'équilibre se déplace totalement, et la réaction est complète, même en contact statique.

Les échanges n'étant pas instantanés et leur, vitesse dépendant du type de résines, ce .mode d'échange conduit en pratique à des courbes de saturation analogues à celle de la figure 104

Les deux types de réactions ci-dessus peuvent être utilisés

- pour éliminer du liquide traité un ou plusieur ions indésirables,
- pour sélectionner et concentrer dans l'échangeur un ou plusieurs ions qui se retrouveront ensuite à l'état purifié et concentré dans le liquide de régénération ou d'élution.

11.1.2.3. Utilisation d'anion complexe préalablement fixé

Cet ion complexe est susceptible de provoquer des réactions secondaires, par

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

exemple des phénomènes d'oxydo-réduction sur les ions de l'eau ou du liquide traité, sans entrer lui-même en solution dans le liquide.

Exemple: absorption de l'oxygène dissous par oxydation d'une résine anionique sulfitée R - NH_3-$S0_3H$ en résine sulfatée. R - NH_3 - SO_4H.

11.1.2.4. Autres utilisations

Les lois de l'échange d'ions ne concernent pas l'utilisation des échangeurs d'ions dans d'autres domaines (catalyse, adsorption).

11.1.3. Méthodes de régénération

Dans le cas des procédés d'adoucissement et de déminéralisation, la fin du cycle se produit lorsque la courbe de saturation correspond à celle de la figure 103 (composés A' et B'). On peut alors considérer, au moins en ce qui concerne les couches supérieures, que l'échangeur d'ions est saturé en ions B' et est en équilibre avec la concentration de B' dans la solution influente.

La régénération est effectuée par percolation d'une solution concentrée d'ions A', soit dans le même sens que la saturation (régénération à co-courant), soit en senscontraire (régénération à contre-courant).

- **Régénération à co-courant** : au cours de cette opération (figure 105), la solution concentrée d'ions A' est d'abord mise au contact de couches d'échangeurs d'ions saturé en ions B', qui vont être chassés de la résine; ces ions B' sont ensuite transportés vers des couches d'échangeurs d'ions qui sont dans un état de moindre saturation et ils retrouvent alors des conditions favorables à leur fixation; ce sont donc principalement des ions A' qui sont élués de la colonne au cours de la première phase de régénération.

Il apparaît donc que, pour une régénération totale de l'échangeur d'ions, il est pratiquement nécessaire de faire subir une double permutation à une quantité d'ions correspondant au rapport A'/B'.

Enfin, si la quantité de régénérant est limitée, les ions B' ne sont pas totalement élués de l'échangeur d'ions et les couches inférieures ne sont pas parfaitement régénérées.

En conséquence, au cycle suivant, les ions B' subiront une autorégénération par les ions A' déplacés des couches supérieures.

- **Régénération à contre-courant:** les phénomènes sont différents lorsqu'on injecte les réactifs de régénération de bas en haut; en effet, dans ce cas, les ions A'

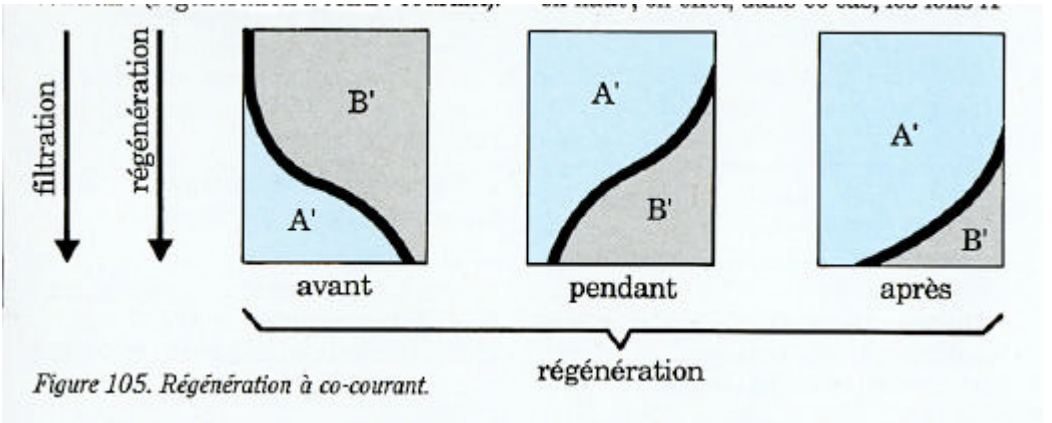


Figure 105. Régénération à co-courant.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

concentrés rencontrent d'abord des couches de résine peu concentrées en ions B' dont l'élution se fait donc dans de bonnes conditions; de plus, dans les couches, supérieures saturées, les ions B' ne peuvent pas se refixer (figure 106).

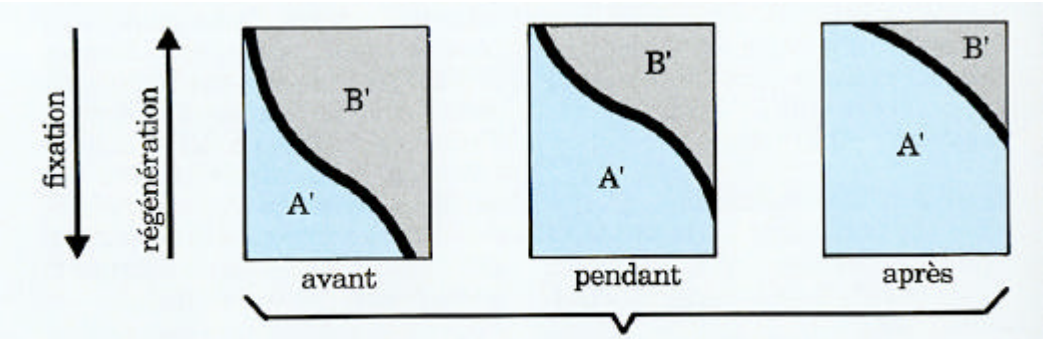


Figure 106. Régénération à contre-courant.

La régénération s'effectue donc dans des conditions beaucoup moins réversibles que dans le cas de l'injection à co-courant, ce qui, thermodynamiquement, correspond à un meilleur rendement.

Deux avantages importants du principe de la régénération à contre-courant doivent être soulignés

- amélioration du rendement et par conséquent diminution des consommations de réactifs à capacité égale,
- amélioration de la qualité de l'eau traitée, les couches de sortie étant régénérées avec un fort excès de réactif.

11.1.4. Vocabulaire de l'échange d'ions

- **Capacité** (ou pouvoir d'échange) d'un échangeur: c'est la masse des ions susceptibles d'être fixés par l'unité de volume (exceptionnellement de masse) de l'échangeur considéré. La capacité est exprimée en équivalents grammes ou en degrés par unité de volume de résine tassée.

On distingue

- la capacité totale, qui est la masse maximale d'ions échangeables, et qui caractérise une résine donnée,
- la capacité utile, qui est la fraction utilisable de la précédente, en fonction des conditions hydrauliques et chimiques de chaque cas particulier d'application.

- **Charge volumique**

$$\frac{\text{Volume horaire de liquide à traiter}}{\text{Volume de résine}}$$

- **Flux d'ions**

Charge volumique X Salinité de l'eau.

- **Niveau de régénération**

$$\frac{\text{Masse de réactif utilisée}}{\text{Volume d'échangeur d'ions}}$$

- **Taux de régénération**

$$\frac{\text{Equivalents grammes de réactif régénérant}}{\text{Equivalents grammes d'ions élués}} \times 100$$

Equivalents gammes d'ions élués

Ce rapport est toujours supérieur ou égal à 100% (100% correspond à la stoechiométrie).

- **Rendement de régénération:** c'est le rapport inverse du précédent.
- **Fuite ionique** (leakage) : concentration de l'ion à fixer demeurant dans l'eau traitée. Elle est exprimée en $mg.l^{-1}$, $\mu g.l^{-1}$, milliéquivalents/litre, parfois en % par rapport à l'influent.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Claquage :** fuite ionique maximale admissible nécessitant l'arrêt du cycle de production.

- **Attritition** : usure mécanique des grains d'échangeurs au cours de leur utilisation.

11.2. PRINCIPAUX TYPES D'ÉCHANGEURS D'IONS

11.2.1. Caractéristiques d'un échangeur d'ions

Un échangeur d'ions, pour être utilisable industriellement, doit répondre aux spécifications suivantes

- **Le produit doit être insoluble dans les conditions normales d'emploi.**

En pratique, tous les échangeurs actuellement utilisés répondent à cette condition, et leur solubilité vraie aux températures ambiantes, est indécelable par les méthodes courantes d'analyse dans les conditions de débit et de température habituelles. Ceci n'est plus vrai pour certains échangeurs si la température dépasse une certaine valeur.

- **Le produit doit être conditionné en granulés aussi homogène que possible et de dimensions telles que leur perte de charge en percolation reste acceptable.**

Les échangeurs d'ions utilisés dans les techniques décrites ci-après se présentent en granulés ayant des dimensions comprises entre 0,3 et 1,2 mm. On utilise pour certains usages spéciaux (traitement de condensats, d'eaux de circuits nucléaires) des résines pulvérisées entre 5 et 30 Nm, dites "microrésines".

- **Les changements d'état de l'échangeur ne doivent pas entraîner la dégradation de sa structure physique.**

Au cours des échanges, l'échangeur peut être amené à fixer des ions ou des complexes ionisés de dimensions et de masse très variables.

Dans certains cas, ceci amène une contraction ou un gonflement non négligeables (jusqu'à 100 % pour certaines résines carboxyliques (HCO_2-R) entre la phase H et la phase NH_4). Ce gonflement et cette contraction ne doivent évidemment entraîner aucun éclatement des grains. D'autre part, le dimensionnement des appareils doit tenir compte, dans les cas les plus difficiles, de la nécessité de permettre cette expansion sans entraîner des contraintes trop importantes au sein de la couche.

Il est bon de ne jamais oublier que la mise en oeuvre des échangeurs d'ions est subordonnée à un certain nombre de conditions que l'on méconnaît trop souvent

- les échangeurs d'ions ne peuvent travailler qu'en présence d'une phase liquide de concentration limitée,
- les échangeurs d'ions sont faits pour fixer les ions, et non pour filtrer des matières en suspension, des colloï des ou des émulsions huileuses. La présence de ces dernières substances ne peut qu'abréger leur durée de vie,
- l'élimination de matières organiques solubles est complexe et nécessite une étude particulière,
- la présence dans l'eau de gaz dissous en grande quantité peut amener d'importantes perturbations dans l'activité des échangeurs,
- les oxydants énergiques Cl_1,, 0_3, affectent les résines,
- enfin, l'exploitation à l'échelle industrielle des résultats de laboratoire ou des documents des fabricants d'échangeurs d'ions nécessite beaucoup de prudence.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les règles de calcul et d'exploitation des appareils ont autant d'importance que la connaissance des performances théoriques des résines.

11.2.2. Échangeurs de cations

- **Échangeurs minéraux et charbons sulfonés:** ces produits ne présentent plus qu'un intérêt historique.
- **Echangeurs synthétiques**, ils peuvent se classer en deux groupes

- les échangeurs de cations fortement acides,
- les échangeurs de cations faiblement acides.

11.2.2.1. Échangeurs fortement acides

Ils sont caractérisés par la présence de radicaux sulfoniques HSO_3 ayant des acidités voisines de celle de l'acide sulfurique. Actuellement ce sont des **polystyrènes sulfonés** obtenus par

- copolymérisation de styrène et de divinylbenzène effectuée sous forme d'émulsion de façon à obtenir des sphères parfaites à la solidification,
- sulfonation des billes ainsi obtenues.

Les produits résultants de cette préparation sont pratiquement monofonctionnels. Leurs propriétés physiques et chimiques varient suivant le pourcentage de divinylbenzène par rapport au styrène, appelé taux de réticulation ou de croisement, et qui oscille généralement entre 6 et 16%.

Pour l'utilisation en lits fixes, à vitesse de percolation modérée, et pour le traitement d'eaux de caractéristiques moyennes, la deuxième colonne du tableau 40 énumère un certain nombre de produits d'usage courant.

Ces produits ne conviennent plus lorsqu'il s'agit de traitements (discontinus ou continus) à grande vitesse, à cycles d'utilisation fréquents, ou de traitements d'eaux oxydantes. On trouve donc sur le marché des résines spécialement étudiées, qui sont le plus souvent à fort taux de réticulation, et généralement aussi du type "macroporeux".

Les résines les plus connues sont énumérées ci-dessous.

Échangeurs fortement acides.

	NOM DU PRODUIT	
Fournisseur	**Type gel**	**Type** macroporeux
Bayer	Lewatit S 100	Lewatit SP 112
Duolite	Duolite C20	Duolite C 26
Dow Chemical	Dowex HCR - S	Dowex MSC - 1
Rohm et Hass	Amberlite IR 120	Amberlite IR 200

11.2.2.2. Échangeurs faiblement acides

Ce sont des résines polyacryliques caractérisées par la présence de radicaux **carboxyliques** HCO_2, pouvant s'apparenter à certains acides organiques tels que l'acide formique ou acétique. Ils se différencient des échangeurs fortement acides sur deux points

- ils fixent seulement les cations Ca, Mg, Na, etc. liés aux bicarbonates, mais ne peuvent échanger les cations en équilibre avec des anions forts (SO_4, Cl, NO_3),
- ils se régénèrent plus facilement, avec des taux de régénération voisins de la stoechiométrie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les résines carboxyliques les plus connues actuellement sont énumérées ci-dessous

	NOM DU PRODUIT	
Fournisseur	**Type gel**	**Type macroporeux**
Bayer		Lewatit CNP 80
Duolite	Duolite C 433	Duolite C 464
Dow Chemical	Dowex CCR 2	
Rohm et Haas	Amberlite IRC 50	
	IRC 84	

11.2.3. Échangeurs d'anions

On peut séparer les échangeurs d'anions en deux groupes

- les échangeurs d'anions faiblement ou moyennement basiques,
- les échangeurs d'anions fortement basiques,

La distinction entre les deux types peut se faire pratiquement de la manière suivante:

- les faiblement basiques ne fixent pas les acides très faibles, tels que l'acide carbonique ou la silice, alors que les fortement basiques les fixent totalement,
- les fortement basiques sont seuls capables de libérer les bases de leurs sels suivant la réaction type

$$R - OH + NaCl \rightleftarrows R - Cl + NaOH$$

- les faiblement basiques sont plus ou moins sensibles à l'hydrolyse caractérisée par le déplacement par l'eau pure des anions préalablement fixés sur la résine

$$R - Cl + H_2O \rightleftarrows R - OH + HCl$$

alors que les fortement basiques sont à peu près insensibles à ce phénomène.

- les faiblement basiques se régénèrent plus facilement.

11.2.3.1. Échangeurs d'anions faiblement ou moyennement basiques

Tous ces produits comportent un mélange d'amines primaires, secondaires, tertiaires et parfois quaternaires. Le noyau de la molécule est de nature très variée, ce noyau pouvant être aliphatique, aromatique ou hétérocyclique.

On trouvera ci-après, une liste non exhaustive de résines de ce type. Certaines de ces résines sont de structure macroporeuse.

	NOM DU PRODUIT	
Fournisseur	**Type gel**	**Type Macroporeux**
Bayer		Lewatit MP 64
Duolite		Duolite A378
Dow Chemical	Dowex WGR 2	Dowex MWA 1
Rohm et Haas	Amberlite IRA 68	Amberlite IRA 93

11.2.3.2. Échangeurs d'anions fortement basiques

L'existence dans la molécule d'ammoniums quaternaires est la caractéristique de ces produits. Toutes les résines fortement basiques utilisées en déminéralisation dérivent de deux schémas généraux appelés communément type I et type II. Le premier comporte des radicaux ammoniums quaternaires simples, le seconde des radicaux ammoniums quaternaires alcoylés. Chacun de ces types a son domaine propre d'applications, qui est conditionné par la nature de l'eau à

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

traiter et par les modalités de régénération.

Les deux types diffèrent par les propriétés suivantes:

- dans le type I, la basicité est forte, la capacité faible; le rendement de régénération est médiocre, - dans le .type II, la basicité est plus faible, la capacité plus élevée; le rendement de régénération est meilleur.

On trouvera ci-après, une liste non limitative de résines utilisées pour les applications courantes

	Type gel		**Type macroporeux**	
Fournisseur	Type I	Type II	Type I	Type II
Bayer	Lewatit M 500	Lewatit M 600	Lewatit MP 500	Lewatit MP 600
Duolite	Duolite A 101	Duolite A 102	Duôlite A 161	Duolite A 162
Dow Chemical	Dowex SBR	Dower SAR	Dowex MSA 1	Dowex MSA 2
Rohm et Haas	Amberlite IRA 400	Amberlite IRA 410	Amberlite IRA 900	Amberlite IRA 910

11.2.4. Quelques données numériques

11.2.4.1. Capacité totale

Le tableau donne des indications sur les capacités d'échange totale des différentes catégories d'échangeurs exprimées en équivalents-grammes par litre de résine.

Nature de l'échangeur	Type gel	type macro-poreux
Cation faible-ment acide	3 5 à 4,2	2,7 à 4,8
Cation fortement acide	14 à 2,2,	1,7 à 1,9
Anion faible-ment basique	1,4 à 2,0	1,2 à 1,5
Anion fortement basique		
J de type I	1,2 à 1,4	1,0 à 1,1,
- de type 11	1,3 à 1,5	1,1, à 1,2

11.2.4.2. Niveaux de régénération

Ils ne dépendent que très peu de la nature de la résine, mais **essentiellement des conditions d'utilisation;** ce qui explique les écarts constatés. Les valeurs ci-dessous sont exprimées en grammes de produit pur par litre de résine

Cation fort	NaCl	80 à 300
	H_2SO_4	80 à 250
	HCl	40 à 200
Cation faible	110% de la capacité utilisée	
Anion faible	NaOH	40 à 100
	NH_3	30 à 60
	Na_2CO_3	60 à 130
Anion fort	NaoH	40 à 200

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

11.2.5. Résines adsorbantes et particulières

11.2.5.1. Résines adsorbantes

Ce sont des produits destinés à fixer, autrement que par échange d'ions et de façon réversible, des composés non ioniques (essentiellement des molécules organiques) en solution dans des solvants polaires et non polaires.

Les phénomènes d'adsorption sur des solides sont très complexes et mettent en jeu de nombreux types d'interaction entre la surface adsorbante et les molécules adsorbées.

De ce fait, la capacité d'adsorption des résines dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont

- la composition chimique du squelette (polystyrénique, polyacrylique, formophénolique),
- la nature des groupements fonctionnels des adsorbants polaires (amines secondaires, tertiaires, ammonium quaternaire),
- le degré de polarité,
- la porosité (produits généralement macroporeux avec des dimensions de pore allant jusqu'à 130 nm),
-1a surface spécifique: jusqu'à 750 m^2 g^{-1}, - l'hydrophilie,
- la forme des grains.

Les applications possibles sont

- protection des chaires d'échange d'ions par fixation de polluants présents dans l'eau d'alimentation (acides humiques, détergents,...),
- décoloration de sirops de sucre, glycérine, moûts de raisin, lactosérum, etc.
- séparation, purification, concentration dans l'industrie pharmaceutique et la chimie de synthèse.

Le mode de régénération des résines adsorbantes dépend essentiellement du produit adsorbé. Les éluants classiques sont: acides, bases, chlorure de sodium, méthanol, solvants organiques adaptés et dans certains cas eau pure, ou vapeur.

Le choix de l'adsorbant est difficile; il est guidé par les caractéristiques des adsorbants et des produits à fixer. Des études de laboratoires ou pilotes sont ensuite indispensables dans la majorité des cas.

11.2.5.2. Résines particulières

- Résines polyfonctionnelles : ce sont des produits combinant les propriétés de résines fortes et de résines faibles. C'est le cas des résines anioniques qui permettent d'éliminer tous les anions y compris la silice et le CO_2 tout en assurant une capacité d'échange élevée et un excellent rendement de régénération grâce à leur fonction base faible.
- **Résines chelatantes** : elles comportent des groupements fonctionnels Particuliers (aminophosphoriques, aminodiacétique, aminodioxime, mercaptan) permettant la fixation sélective de métaux lourds de différents effluents (zinc, plomb, mercure, ...), des séparations chromatographiques de métaux, l'adoucissement final de saumures d'électrolyse.
- **Résines à usage nucléaire:** ce sont des produits d'un degré de pureté supérieur à celui des résines employées dans les applications courantes : résines cationiques fortes sous forme H^+ régénérées à 99%, résines anioniques fortes sous forme OH avec moins de 0,1% de Cl^-.
- **Résines catalysantes**

- résines classiques en catalyse basique ou acide (ex. inversion du glucose pour la fabrication de sucre liquide),
- résines avec un catalyseur métallique (ex. résine au palladium pour la désoxygénation d'eau déminéralisée ou d'eau de mer).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

11.3. SCHÉMAS CLASSIQUES DE MISE EN OEUVRE

11.3.1. Généralités

Il est important de souligner que les procédés d'échange ionique ne doivent être mis en oeuvre qu'après un prétraitement adapté à chaque qualité d'eau brute et comportant, en particulier, l'élimination des matières en suspension, des matières organiques, du chlore résiduel, des chloramines, etc. Ce prétraitement est variable selon les types d'échangeurs d'ions utilisés.

Les chaînes classiques sont constituées de lits fixes d'échangeurs d'ions, régénérés à cocourant : l'eau à traiter et la solution régénérante percolent à travers le lit de résine de haut en bas.

Le cycle complet de l'échange comprend les phases suivantes

- fixation *(ou* production) : le cycle de production d'un échangeur est défini par la capacité d'échange de la couche. Celle-ci correspond à une masse d'ions échangeable, et par conséquent, à un volume d'eau traité entre deux régénérations,
- **soulèvement** (ou détassage) : un courant d'eau ascendant détasse le lit de résine et permet d'éliminer les particules et les éventuels débris de résine qui ont pu se rassembler à la surface,
- **régénération**: la solution régénérante percole lentement de haut en bas à travers la couche de résine,
- **déplacement** (ou rinçage lent): de l'eau est injectée au même débit et dans le même sens que le régénérant jusqu'à l'élimination de la presque totalité de celui-ci,
- **rinçage** (ou rinçage rapide): de l'eau est injectée au débit de production jusqu'à obtention de la qualité d'eau traitée permettant de passer en production.

.Description d'une unité d'échange d'ions: quelle que soit la nature de l'échange: adoucissement, décarbonatation ou déminéralisation, chaque appareil est normalement constitué par un récipient cylindrique fermé à axe vertical, contenant la résine. Celle-ci peut être placée directement au contact du dispositif collecteur de liquide traité constitué, soit par des buselures réparties uniformément sur le plateau, soit par un réseau de tubes en nombre et section convenables. La résine peut être également supportée par une couche de matériau granulaire inerte: silex, anthracite ou grains plastiques. Cette couche est elle-même drainée par le réseau collecteur (figure 107).

On ménage au-dessus de la couche de résine un espace libre suffisant pour permettre son expansion normale (entre 30 et 100 % du volume tassé suivant la nature de la résine) au moment des détassages à contre-courant

L'eau à traiter et le régénérant sont admis à la partie supérieure du récipient par un système répartiteur plus ou moins élaboré.

L'appareil est muni d'une batterie externe de vannes et de tuyauteries permettant d'exécuter les diverses opérations de fixation, détassage, régénération, rinçage. Les vannes peuvent être à commande manuelle ou automatique ou même remplacées par une vanne centrale à passages multiples.

Remarque: il est admis dans ce qui suit, que les réactions sont complètes, bien qu'il existe toujours une légère fuite ionique.

11.3.2. Adoucissement

On utilise un échangeur de cations que l'on régénère avec une solution de chlorure de sodium (figure 108).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tous les sels de l'eau traitée sont transformés en sels de sodium. Le titre hydrotimétrique de l'eau traitée est pratiquement nul. Son pH et son alcalinité restent inchangés. L'adoucissement peut être effectué après une épuration préalable à la chaux qui élimine les bicarbonates et réduit le TAC à une valeur généralement comprise entre 2 et 4 °F. Dans ce cas, l'eau obtenue est à la fois décarbonatée et adoucie (figure 109).

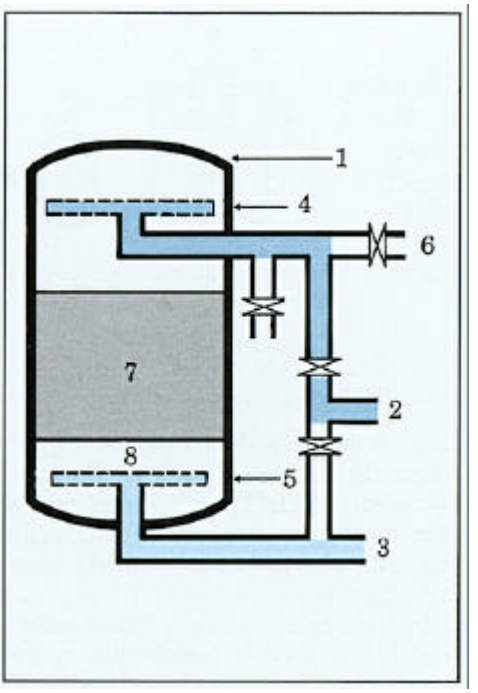


Figure 107. Adoucisseur

11.3.3. Décarbonatation

Elle met en ceuvre une résine carboxylique préalablement régénérée par un acide de façon à la mettre sous forme de R-H (figure 110). Cette résine a la propriété de fixer les cations métalliques et de libérer les anions correspondants sous forme d'acide libre, jusqu'à ce que le pH de l'eau traitée atteigne une valeur comprise entre 4 et 5 ; ceci correspond à la libération totale de l'acide carbonique des bicarbonates, les cations liés aux anions d'acides forts (chlorures, nitrates, sulfates) n'étant pas fixés par la résine.

Dans ces conditions, l'eau traitée renferme tous les sels d'acides forts initiaux et une quantité de CO_2 dissous équivalente aux bicarbonates de l'eau brute. Cette eau peut présenter une alcalinité nulle et une dureté égale à la valeur TH-TAC de l'eau

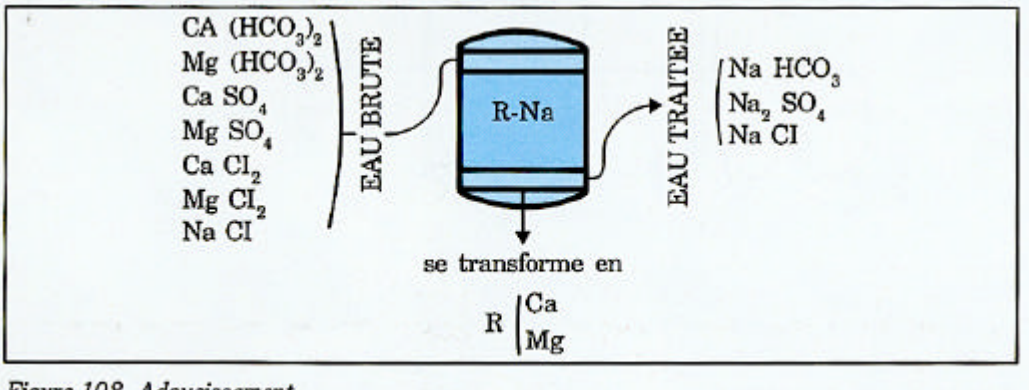


Figure 108. Adoucissement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

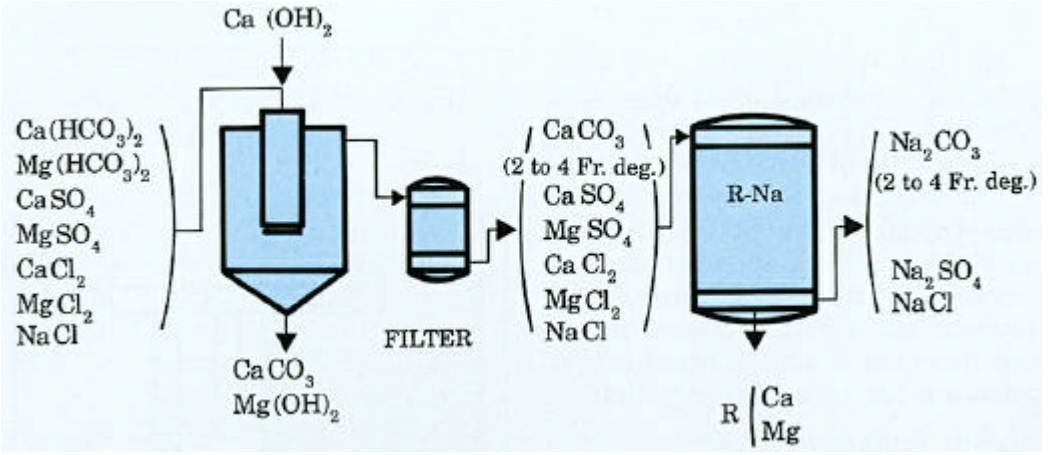


Figure 109.Décarbonatation à la chaux et adoucissement.

brute ; la dureté peut donc être nulle si le TH est inférieur ou égal au TAC, les ions alcalino-terreux étant échangés de préférence aux ions alcalins.

Dans le cas contraire, il est possible d'obtenir une dureté nulle en combinant dues le même appareil une couche de résine carboxylique et une couche de résine sulfonique, régénérées successivement avec un acide fort et une solution de chlorure de sodium. La résine carboxylique travaille en cycle H et fixe le TH en quantité équivalente au TAC. La résine sulfonique, permute les ions sodium contre la dureté permanente qui est égale à TH-TAC. On obtient ainsi une eau décarbonatée et adoucie.

Dans le cas **d'eaux bicarbonatées sodiques,** le rendement de fixation des résines carboxyliques devient mauvais et on a parfois recours à la méthode **dite H-Na,** qui consiste à placer en parallèle une résine sulfonique mise sous forme H et une autre mise sous forme Na; la première résine fixe tous les cations et libère les acides correspondants, la seconde produit de l'eau adoucie. Le mélange en proportion convenable de l'eau décationnée et de l'eau adoucie aboutit à la même composition de l'eau traitée que celle du

Figure 110. Décarbonatation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

schéma précédent. Cependant, cette méthode présente l'inconvénient de nécessiter une proportionnalité rigoureuse de l'eau acide et de l'eau bicarbonnatée sous peine de produire un mélange acide, donc corrosif.

Dans tous ces schémas, il est utile d'éliminer leCO_2dissous libéré par l'échange d'ions.

11.3.4. Déminéralisation

La déminéralisation fait l'objet d'un certain nombre de variantes basées essentiellement sur les paramètres suivants
qualité d'eau à obtenir, composition de l'eau à traiter, consommation de réactifs de régénération. D'autres considérations (investissement, implantation...) peuvent également avoir une influence sur la composition de la chaîne.

La description donnée ci-après des groupements d'échangeurs les plus fréquents, utilise la notation
- Cf : cation faiblement acide
- CF : cation fortement acide,
- Af : anion moyennement ou faiblement basique,
- AF : anion fortement basique,
- $|CO_2|$: élimination de CO_2,
- LM : lits mélangés (Mixed-bed).

11.3.4.1. Déminéralisation partielle

Elle comporte un appareil chargé **d'échangeur de cations fortement acide** (CF), régénéré par un acide fort, qui fonctionne en série avec un appareil chargé **d'échangeur d'anions faiblement (ou moyennement) basique** (Af), régénéré par la soude ou l'ammoniaque. L'eau produite est utilisée telle quelle si l'acidité carbonique n'est pas nuisible, ou dégazée sur un éliminateur de CO_2 situé en amont ou en aval de l'échangeur anionique (figure 111).

L'eau traitée contient la totalité de la silice présente et, si elle est dégazée, environ 15 $mg.l^{-1}$ d'acide carbonique; suivant le taux de régénération adopté pour l'échangeur de cations, la conductivité peut varier entre 2 et 20 ì $S.cm^{-1}$. Le pH est de l'ordre de 6 à 6,5 si l'élimination du 243 dioxyde de carbone est effectuée correcte
ment

Une telle chaîne produit de l'eau pour les chaudières à moyenne pression et pour certains procédés industriels.

11.3.4.2. Déminéralisation totale

- **Chaîne CF + AF :** tous les ions, y compris la silice, sont éliminés (figure 112). Le plus souvent, on a intérêt à réduire le flux d'ions envoyé sur l'échangeur d'anions,

Figure 111. Déminéralisation partielle.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

en intercalant entre ce dernier et l'échangeur de cations un éliminateur deCO_2qui en abaisse la teneur à quelques $mg.l^{-1}$. Ceci permet de diminuer le volume de résine anionique forte et la consommation de réactif de régénération.

La qualité de l'eau déminéralisée est principalement fonction du taux de régénération de l'échangeur de cations. La fuite ionique est constituée par une trace de soude caustique (ou de chaux, si l'eau brute ne contient pas de sodium) provenant de l'échangeur de cations. La réduction de la teneur en silice est elle-même fonction de la teneur en soude subsistant dans l'eau déminéralisée. En pratique, on obtient le plus souvent une eau ayant une conductivité de 3 à 20 ì $S.cm^{-1}$, une teneur en silice de 0,05 à 0,5 $mg.l^{-1}$ et un pH compris entre 7 et 9.

Ce schéma est le plus simple et permet d'obtenir une eau déminéralisée utilisable dans un grand nombre d'applications.

- **Chaîne CF + Af + AF** : cette chaine (figure 113) est une variante de la précédente qui aboutit à une qualité d'eau identique, mais présente un intérêt économique lorsque l'eau à traiter contient une forte proportion d'anions forts (chlorures et sulfates). L'eau traverse successivement l'échangeur d'anions faiblement basique et l'échangeur d'anions fortement basique. L'éliminateur d'acide carbonique est facultatif et peut être placé

Figure 112. Déminéralisation totale.

Figure 113. Déminéralisation totale avec deux échangeurs d'anions.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

soit entre l'échangeur de cations et le premier échangeur d'anions, soit entre les deux échangeurs d'anions.

La régénération des échangeurs d'anions s'effectue en série, la solution de soude traversant d'abord la résine fortement basique, puis la faiblement basique. Cette méthode permet une économie de soude considérable par rapport à la précédente, car, en général, l'excès de soude provenant de la régénération à dose normale de la résine fortement basique est suffisant pour régénérer complètement la résine faiblement basique. De plus, lorsque l'eau brute est chargée de matières organiques, la résine faiblement basique protège la résine fortement basique.

- **Chaînes avec groupement Cf + CF:** ce groupement est intéressant lorsque l'eau contient une proportion notable de bicarbonates. La régénération s'effectue en série traversant successivement l'échangeur sulfonique et l'échangeur carboxylique.

Étant donné que la régénération de la résine carboxylique s'effectue à peu près stoechiométriquement à partir de l'excès d'acide libre subsistant après la régénération de la résine sulfonique, le taux de régénération global est considérablement abaissé.

La figure 114 présente une chaîne qui permet une consommation minimale des réactifs.

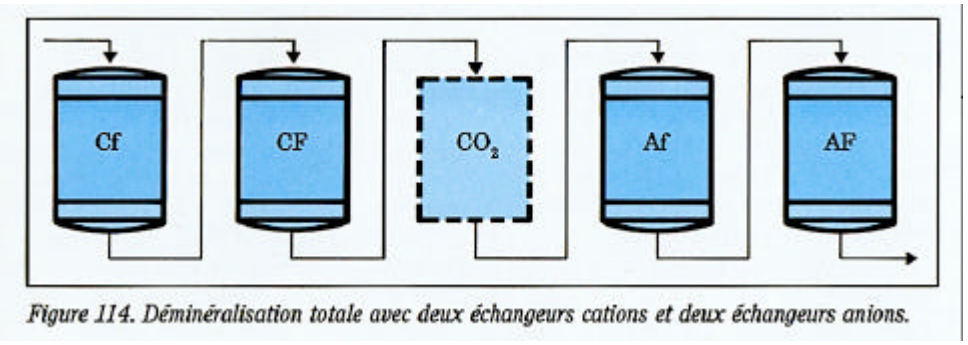


Figure 114. Déminéralisation totale avec deux échangeurs cations et deux échangeurs anions.

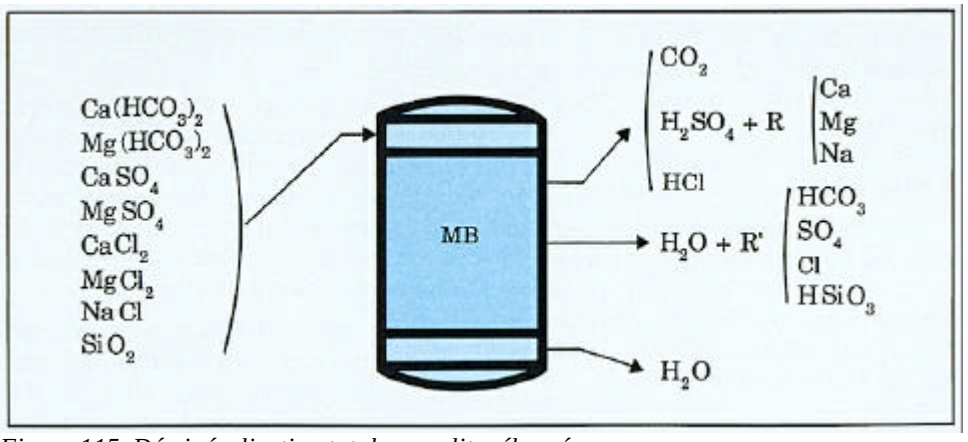


Figure 115. Déminéralisation totale avec lit mélangé

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Lits mélangés (LM)** : ce procédé diffère essentiellement de la solution à lits séparés du fait que deux résines fortes, cationique et anionique, sont réunies dans un seul appareil. Elles sont intimement mélangées par brassage à l'air comprimé. Les grains de résine ainsi disposés côte à côte se comportent donc comme une infinité d'échangeurs de cations et d'anions en série (figure 115).

Pour effectuer la régénération, les deux résines sont classées hydrauliquement lors du détassage. La résine anionique, plus légère se place au-dessus, la résine cationique, plus lourde, se dépose dans le fond.

Après séparation des résines, chacune d'elles est régénérée séparément respectivement avec de la soude caustique et un
acide fort. L'excès de régénérant est ensuite évacué par rinçage de chaque lit. Après vidange partielle de l'appareil, les résines sont mélangées à l'air comprimé. On termine le rinçage et l'appareil est prêt pour un nouveau cycle.

Les avantages des lits mélangés, par rapport aux lits séparés, sont les suivants
- obtention d'une eau de très haute pureté et de qualité constante au cours du cycle, (conductivité inférieure à 0,2 ì S.crn $^{-1}$, silice inférieure à 20 ì g.l^{-1}),
- pH voisin de la neutralité,
- consommation d'eau de rinçage très faible.

Les inconvénients du lit mélangé sont le pouvoir d'échange plus faible et la conduite plus délicate entraînée par la nécessité d'une séparation et d'un mélange des résines parfaitement corrects.

Les échangeurs à lits mélangés peuvent être utilisés directement sur des eaux brutes à condition qu'elles soient faiblement minéralisées (eaux préalablement traitées par osmose inverse ou distillation, eaux condensées, eaux de piscines nucléaires en circuits fermés, etc.). Un seul lit mélangé est susceptible de remplacer une chaîne complexe d'échangeurs d'ions.

Des schémas particuliers peuvent comporter
- CF + |CO_2| + LM,
- adoucisseur + LM,
- CF + Af + |CO_2| + LM: schéma intéressant pour une eau riche en anions forts.

Cependant, c'est en traitement de finition que les échangeurs à lits mélangés sont le plus souvent utilisés.

- **Installation comportant une chaîne de finition:** la qualité de l'eau sortant d'une chaîne primaire quelle que soit sa composition, est déterminée par la fuite ionique de l'échangeur de cations. Cette fuite ionique, variable suivant les caractéristiques de l'eau brute et le taux de régénération, ne permet pas d'obtenir une qualité suffisante pour certains emplois de l'eau déminéralisée, tels que l'alimentation des chaudières à très haute pression et certaines applications dans les industries chimiques, nucléaires ou électroniques. Il faut donc traiter à nouveau sur une chaîne dite de finition.

La fuite ionique de l'échangeur de cations est transformée en base libre sur l'échangeur d'anions avec pour conséquence une fuite en silice de celui-ci. Par conséquent, une chaîne de finition doit nécessairement comporter un échangeur de cations fortement acide et un échangeur d'anions fortement basique.

Elle peut se présenter sous forme de deux colonnes en série, la régénération se fait dans le sens AF2-AF1 et CF2-CF1. Dans ces conditions les échangeurs de finition sont parfaitement régénérés et la

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

qualité de l'eau déminéralisée est excellente (conductivité inférieure à 1 ì S.crn^{-1}, teneur en silice comprise entre 5 et 20 ì g.l^{-1}).

Cependant, ce système est de moins en moins utilisé. On lui préfère les échangeurs à lits mélangés qui permettent d'atteindre une conductivité de l'ordre de 0,05 ì S.cm 1 à 25 °C et des fuites en silice nettement inférieures à 10 ì g.l $^{-1}$. Un lit mélangé de finition, en raison de la faible charge ionique influente n'est régénéré que tous les 5 à 10 cycles de la chaîne primaire.

11.4. PRINCIPE DE CALCUL D'UNE CHAÎNE DE DÉMINÉRALISATION

Les éléments suivants sont nécessaires au calcul

- titre TAC de l'eau brute en °F,
- titre SAF de l'eau brute en °F ($S0_4$ + Cl + $N0_3$),
- teneur en silice $TSi0_2$ (1° =12 mgl^{-1} SiO_2),
- teneur en acide carbonique de l'eau après passage sur cation et éventuellement élimination d'acide carbonique, TCO_2,
- volume V d'eau à fournir entre régénérations, en m^3, y compris éventuellement les eaux de service,
- débit horaire Q en m^3,
- pouvoir d'échange C des résines exprimé en degrés-litres par litre de résine tassée. (Les degrés peuvent être remplacés par les milliéquivalents, sachant qu'i1s milliéquivalent = 5 °F.)

Pour certaines applications, on peut se contenter en finition d'un échangeur de cations faiblement ou fortement acide destiné à neutraliser la fuite en soude de l'échangeur d'anions de la chaîne primaire. Cet échangeur de finition, dit "filtre tampon" permet d'obtenir une eau pratiquement exempte de cations (conductivité inférieure à 1 ì S.cm^{-1}) ayant un pH compris entre 6 et 7

Pour les chaînes classiques, le pouvoir d'échange est calculé pour chaque résine à partir de documents fournis parle fabricant On calcule d'abord l'échangeur d'anions de capacité C ; le volume à utiliser est donné par les formules

$$V_a = \frac{V \times SAF}{C}$$

s'il s'agit d'un échangeur faiblement basique, et

$$V_a = \frac{V \times (SAF + TCO_2 + TSiO_2)}{C}$$

s'il s'agit d'un échangeur fortement basique.

On calcule ensuite l'échangeur de cations en tenant compte de l'eau supplémentaire a Va nécessaire au rinçage de l'échangeur d'anions, pouvant varier entre 5 et 20 suivant le type de résine. On a alors

$$V_c = \frac{(V + \alpha V_a)\ (SAF + TAC)}{C}$$

Les volumes ainsi calculés doivent alors être comparés avec le débit horaire à traiter. Il existe en effet des limites supérieures à la vitesse de passage ou à la charge volumique.

Si V_c, ou V_a sont trop faibles, il y a lieu de les réajuster, quitte à accroître le volume de cycle V.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

11.5. CONTRÔLE ET ENTRETIEN D'UN POSTE DE DÉMINÉRALISATION

11.5.1. Contrôle du traitement

Les contrôles à effectuer sur un poste de déminéralisation comportent essentiellement les mesures suivantes
- conductivité (ou résistivité),
-concentration en silice,
-éventuellement dureté,
-concentration en sodium,
- pH.
La fiabilité maximale est obtenue par des contrôles continus automatiques, en particulier pour la conductivité, la silice, le pH.

Pour interpréter correctement la mesure de la conductivité et en déduire la valeur de la fuite ionique, il faut noter que normalement, dans une installation convenablement calculée, l'eau déminéralisée contient exclusivement des traces de soude caustique (voir chapitre 8, § 3.2.2).

11.5.2. Désinfection des résines

On rencontre parfois des difficultés d'exploitation dues à la présence de micro-organismes
- colmatage du lit par envahissement de colonies bactériennes (spécialement avec les résines carboxyliques),
- empoisonnement interne des pores de la résine (spécialement avec les échangeurs d'anions).

Les remèdes, qu'il ne faut surtout appliquer qu'après consultation d'un spécialiste, sont de deux sortes
- préventifs, par chloration préalable, continue ou discontinue, de l'eau brute,
- curatifs, par désinfection de la couche de résine, soit au formol, soit avec une solution d'un produit à base d'ammoniums quaternaires, soit avec une saumure à 2 00 $g.l^{-1}$ en NaCl, alcalinisée à pH 12 à l'aide de soude.

11.5.3. Stockage des résines

11.5.3.1. Dans leur emballage d'origine

- **Protection contre la déshydratation:** il faut conserver les résines dans leur emballage intact à l'abri du soleil et à une température n'excédant pas 40 °C. Vérifier périodiquement l'étanchéité des emballages, maintenir l'humidité de la résine si les emballages ont été ouverts, en aspergeant d'eau si nécessaire, avant de refermer.
- **Protection contre le gel:** on peut soit stocker dans un local hors gel, soit traiter les résines avec une saumure saturée.

11.5.3.2. Dans une installation

- **Protection contre la déshydratation:** maintenir les colonnes remplies d'eau en permanence.

.Protection contre le gel: remplacer l'eau par une saumure saturée qui assure une protection jusqu'à une température de - 17 °C. Pour des températures inférieures, utiliser un mélange eau/glycol dans une proportion appropriée.

- **Protection contre les développements bactériens:** avant la mise à l'arrêt, il convient d'éliminer les matières en suspension par un lavage prolongé à contrecourant. Les résines cationiques et anioniques doivent être conservées à l'état saturé; c'est également pour les résines anioniques, un moyen d'éviter l'hydrolyse des groupes fortement basiques en grou

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

pes faiblement basiques et en groupes non ioniques, ce qui entraîne des pertes de capacité.

Les lits d'échangeurs cationiques peuvent être remplis d'une solution de formol à 0,5%. II est recommandé de contrôler périodiquement la concentration et de veiller à ce qu'elle ne tombe pas en-dessous de 0,2 %.

Les lits d'échangeurs anioniques peuvent être remplis d'une solution à 0,1 % d'un sel d'ammonium quaternaire.

La solution consiste à remplir l'installation avec une saumure titrant au minimum 200 $g.l^{-1}$ est également efficace; elle constitue en outre, une solution contre le gel et l'hydrolyse.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

12. OXYDATION - RÉDUCTION

12.1. PRINCIPE LE POTENTIEL REDOX

Certains corps se présentent sous forme oxydée ou réduite, et passent de l'une à l'autre par gain d'électron (réduction) ou perte d'électron (oxydation). Un couple formé d'un accepteur et d'un donneur d'électron est appelé système oxydoréducteur.

$$Red \rightleftarrows Oxyd.^{n+} + ne^{-}$$

par exemple du fer,

$$Fe^{2+} \rightleftarrows Fe3^{+} + e^{-}$$

Il faut remarquer qu'à part les corps "oxygène" et "hydrogène" qui ne peuvent être respectivement qu'un oxydant et qu'un réducteur, il n'y a pas de corps qui soient oxydants ou réducteurs de manière absolue.

Cette possibilité d'intéraction est caractérisée par le potentiel d'oxydoréduction ou potentiel redox, fonction de l'activité des deux formes, oxydée et réduite, selon la formule (voir page 206)

$$E_o = E_o^o + \frac{K}{n} \log \frac{|\text{(forme oxydée)}|}{|\text{(forme réduite)}|}$$

où n est le nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction d'oxydoréduction, E_0^0 est le potentiel dit normal correspondant à l'équilibre: | (forme oxydée) | = | (forme réduite) | .

Le potentiel d'oxydoréduction est mesuré par un couple d'électrodes constitué d'une électrode inattaquable (platine, or) et d'une électrode de référence, qui est généralement une électrode au calomel saturé de MI (figure 116). Le potentiel mesuré E_{Hg}, positif ou négatif par rapport à l'électrode au calomel, exprimé en volts, doit être rapporté à celui de l'électrode à hydrogène E_H en se souvenant que la première est positive soit à 20° C :

$E_H = E_{HG} + 0{,}248$ V

Le rH, ou pouvoir oxydoréducteur, est calculé à partir de l'équation découlant de celle de Nernst:

$$rH = \frac{E_H}{0{,}029} + 2pH = \frac{A \pm E_{Hg}}{0{,}029} + 2pH$$

En comparant les potentiels E', il est possible d'établir un classement des différents corps. Un corps A possédant un

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

potentiel normal plus élevé qu'un corps B oxydera ce dernier; le corps B est alors et réducteur du corps A.

Par définition, on prend le potentiel d'une électrode à hydrogène comme égal à 0. Les valeurs du potentiel normal à 25 °C de certains corps rencontrés dans l'eau sont donnés dans le tableau 40.

Dans la pratique, le passage d'un élément d'une forme oxydée à une forme réduite se fait le plus souvent par utilisation d'un autre corps passant lui-même de la forme réduite à la forme oxydée

$$aOx_1 + bRed_2 \rightleftarrows aRed_1 + bOx_2$$
(équation redox)

Il y a donc mélange de deux couples. Le mélange de quantités équivalentes d'oxydant de l'un des couples et du réducteur d'un autre couple $a(Ox_1) = b(Red_2)$ permet d'atteindre le point d'équivalence. Le potentiel du système est alors défini par:

$$E = \frac{bE_1 + a\,E_2}{a + b}$$

Ce potentiel est caractérisé par le point d'inflexion de la courbe de titrage du potentiel en fonction de la concentration en oxydant.

Tableau 40. Potentiels d'oxydoréduction normaux de composés oxygénés

Eh = 0 volt		
		E0 volt
$OH^0 + H^+ + e^-$	$\rightarrow H_20$	**2.76**
$0_3 + 2H^+ + 2e^-$	$\rightarrow 0_2 + H_20$	**2.07**
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^-$	$\rightarrow 2H_20$	**1.76**
$Cl_2 + 2e^-$	$\rightarrow 2Cl^-$	**1.36**
$HOBr + H^+ + 2^{e-}$	$\rightarrow Br^- + H_20$	**1.33**
$0_3 + H_2O + 2e^-$	$\rightarrow 0_2 + 2OH^-$	**1.24**
$ClO_2 + e^-$	$\rightarrow ClO_2^-$	**1.15**
$Br_2 + 2e^-$	$\rightarrow 2Br^-$	**1.07**
$HOI + H^+ + 2e^-$	$\rightarrow I^- + H_2O$	**0.99**
$ClO_2aq + e^-$	$\rightarrow ClO^-_2$	**0.95**
$Ocl^- + H_2O + 2e^-$	$\rightarrow Cl^- + 2OH^-$	**0.90**
$HO_2- + H_2O + 2e^-$	$\rightarrow 3OH^-$	**0.87**
$OBr- + H_20 + 2\,e^-$	$\rightarrow Br^- + 20H^-$	**0.70**
$I_2 + 2e^-$	$\rightarrow 2I^-$	**0.54**
$I_3 + 2e^-$	$\rightarrow 3I^-$	**0.53**
$OI^- + H_2O + 2e^-$	$\rightarrow I^0 + 20H^-$	**0.49**

L'eau peut de même participer, selon les conditions expérimentales, à des réaction d'oxydoréduction (cf. page 206).

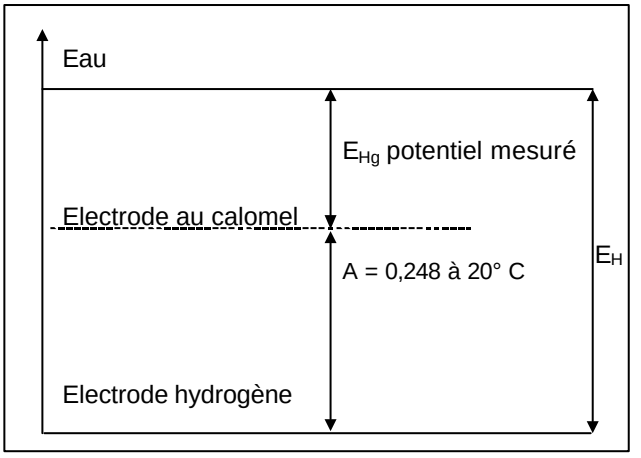


Figure 116. Mesure du potentiel d'oxydoréduction.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

12.2.
BUT

Les réactions d'oxydoréduction sont utilisées en traitement de l'eau

- pour la désinfection des eaux,
- pour faire passer un élément d'une forme dissoute à une forme précipitable (Fe, Mn, élimination des sulfures...).

La définition et le contrôle du pH de la réaction ont une importance primordiale. La figure 117 précise l'état des différentes formes du fer et du manganèse et leur évolution en fonction du pH et du potentiel redox,

- pour faire passer un élément d'une forme dissoute à une forme gazeuse, (exemple: dénitrification),
- pour transformer un corps en plusieurs corps plus simples et dont la présence dans l'eau est acceptable, (exemple: phénols ...),
- pour transformer un corps non biodégradable en plusieurs corps plus simples dont l'assimilationbactérienne est possible lors d'un traitement ultérieur, (exemple: micropolluants),
- l'oxydation peut être réalisée par l'intermédiaire de bactéries chimiotropes

oxydation du fer et du manganèse, oxydation de composés soufrés, oxydoréduction des composés azotés, réduction méthanogène.

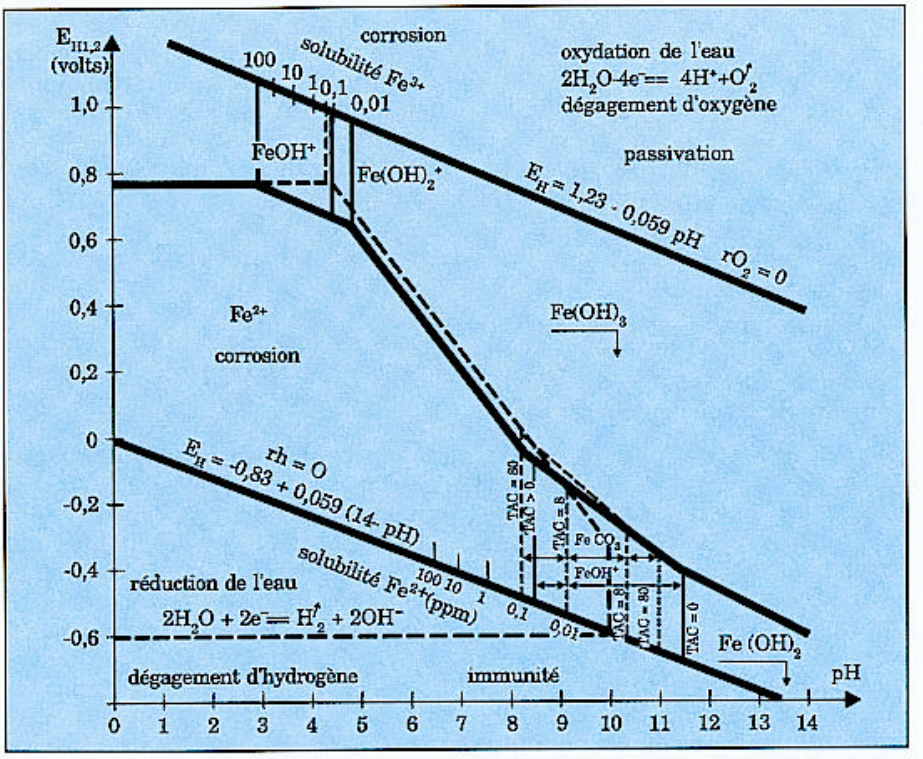


Figure 117. Diagramme "potentiel-pH" du fer. (Domaines d'existence des ions et des précipités) d'après HEM, 1961.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

12.3. LES PRINCIPALES TECHNIQUES D'OXYDATION

12.3.1. Oxydation par voie physique

- **à l'air**

Elle consiste à dissoudre l'oxygène de l'air dans l'eau. Après dissolution, l'oxygène peut oxyder certains composés, à titre d'exemple le fer ferreux en fer ferrique, selon la réaction

$$4Fe^{2+} + O_2 + 8\,OH^- + 2H_2O \rightarrow \underline{4\,Fe\,(OH)_3}\ \downarrow$$

Les techniques mises en oeuvre sont celles développées au chapitre 17.

L'aération par voie physique a pour effet secondaire d'éliminer les gaz dissous qui sont en excès par rapport à la composition de l'air utilisé pour l'aération:

- élimination de H_2S,
- élimination du CO_2 en excès (d'où élévation du pH). Il faut noter qu'une aération trop poussée peut conduire à un pH trop élevé (cf. Équilibre calco-carbonique page 262).

- **à l'oxygène**

Au cas où la demande en oxygène est importante, il peut être intéressant de remplacer, dans une aération sous pression, l'air par de l'oxygène pur. La pression partielle de l'oxygène est ainsi multipliée par cinq pour une même pression d'insufflation, ce qui permet d'augmenter la quantité d'02 dissous dans l'eau à cette pression. Cette technique est principalement utilisée en traitement d'eaux résiduaires.

12.3.2. Oxydation par voie chimique

12.3.2.1. Réactifs gazeux

Les réactifs utilisés sont le chlore et l'ozone.

A) Le chlore. Le chlore est le réactif le plus utilisé pour assurer la désinfection des eaux. Le chlore n'est pas utilisé directement sous forme gazeuse. Il est tout d'abord dissous dans l'eau. Il réagit dans l'eau selon la réaction

$$Cl_2 + H_2O \rightleftarrows HClO + HCl$$

qui s'accompagne de la réaction secondaire:

$$HClO \rightleftarrows ClO^- + H^+$$

La figure 118 rend compte de ce dernier équilibre en fonction du pH. Si le pH est inférieur à 2, tout le chlore est sous forme moléculaire. A pH 5, le chlore moléculaire disparaît et tout le chlore se trouve sous forme HClO A pH supérieur à 10, tout le chlore se trouve sous forme d'ions hypochlorite C1O-.

L'effet bactéricide du chlore est maximal lorsque le chlore est sous forme HClO La figure 118 permet, pour un pH donné compris entre 5 et 10 et une dose donnée de chlore libre mesurée dans une eau, de **calculer** la quantité de chlore présent sous forme de HOCl, qui est alors **appelé le chlore libre** actif (non mesurable directement). Le chlore a un **pouvoir rémanent important.**

Le chlore agit également sur les matières organiques de l'eau et sur l'ammonium. Si, dans plusieurs récipients contenant la même eau, on introduit des doses croissantes de chlore et que l'on mesure le chlore total résiduel dans chacun des récipients après un temps de contact donné (2 heures, par exemple), on obtient la courbe de la figure 119. La courbe en pointillé donne la quantité de chlore libre.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

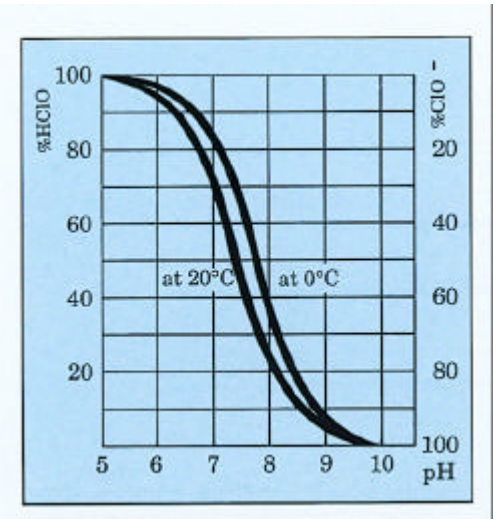


Figure 118. Dissociation de HClO dans l'eau.

Le chlore réagit avec des composés contenant de l'ammonium selon les réactions suivantes :

$HOCl + NH_3 \rightarrow NH_2CI + H_2O$
Monochloramine

$NH_2CI + HOCI \rightarrow NHC1_2 + H_2O$
Dichloramine

$NHCI_2 + HOCl \rightarrow NC1_3 + H_2O$
Trichloramine

$2NH_3+3HOCl \rightarrow N_2+3HC1$

Du début de la courbe jusqu'au point M, il y a formation de mono et dichloramines qui répondent au dosage de chlore résiduel total. Après le point M, le chlore introduit réagit ensuite avec les mono et dichloramines, pour donner des trichloramines qui ne réagissent pas au dosage du chlore résiduel C'est le point P. La dose de chlore p introduite correspond au point **critique (ou point de rupture, ou breakpoint).**

Après le point critique, la dose de chlore total résiduel augmente de la même quantité que le chlore introduit Le chlore résiduel est alors principalement sous forme de chlore libre.

La cinétique de réaction du chlore sur une eau contenant de l'ammonium, et de la formation des sous-produits dépend de nombreux facteurs (pH, température, forme de l'ammonium); elle a été modelisée (SAUNIER 1976).

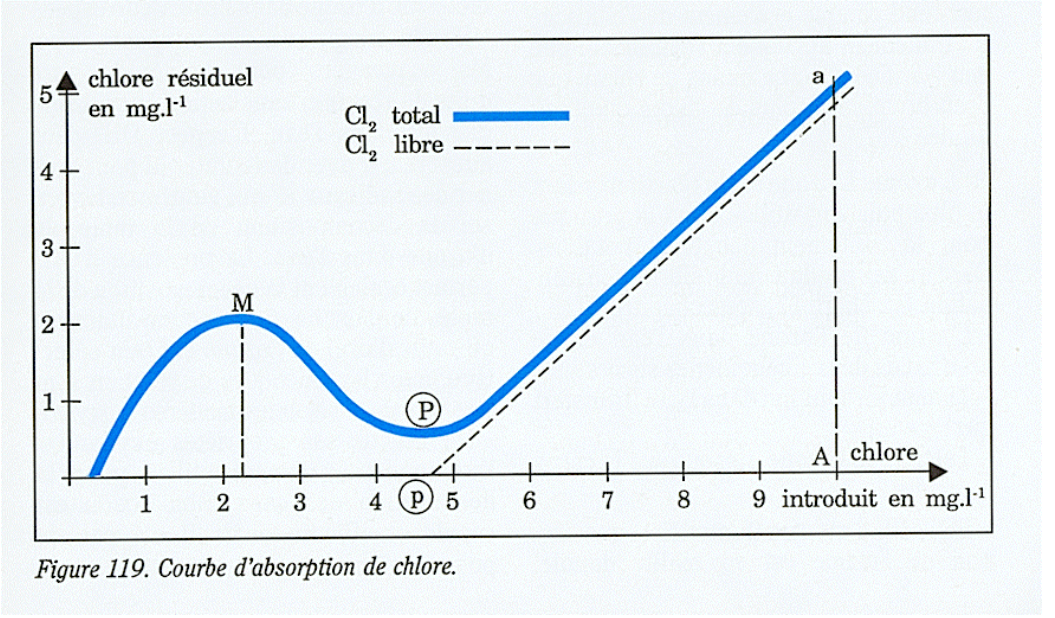


Figure 119. Courbe d'absorption de chlore.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

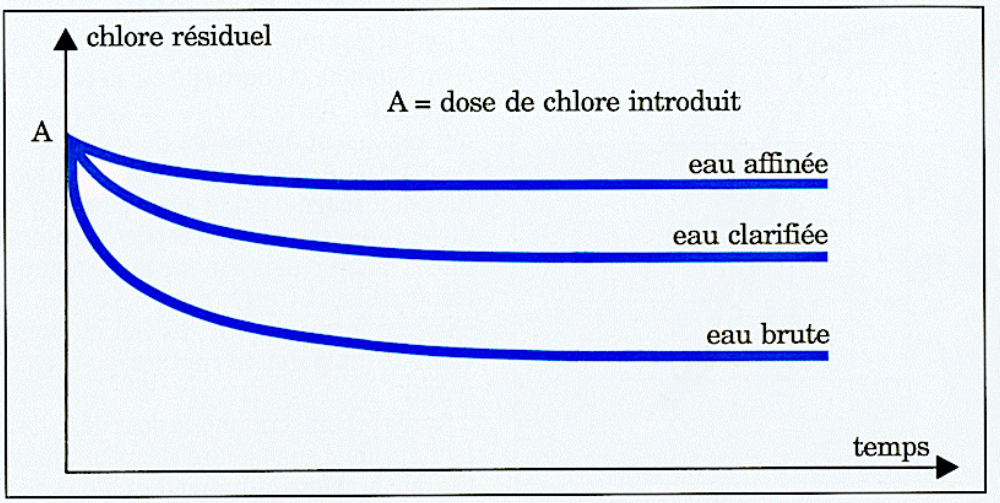


Figure 120. Test de conduite – Absorption de chlore en fonction du temps.

- **Test de conduite:** c'est le test permet tant de connaître la consommation de chlore par une eau en fonction du temps (figure 120). On peut en déduire la quantité de chlore à utiliser pour obtenir un chlore résiduel donné à l'extrémité d'un réseau dont le temps de rétention est connu. Ce test rend compte également de l'efficacité du traitement appliqué à l'eau brute: une eau clarifiée absorbe moins de chlore que l'eau brute, mais plus de chlore que l'eau affinée.

B) **L'ozone.** L'ozone est le réactif oxydant le plus puissant utilisé dans la pratique pour le traitement des eaux potables. C'est un gaz produit sur le site de son utilisation (cf. chap. 17, sous-chapitre 4).

L'action de l'ozone dans l'eau est le résultat de deux phénomènes successifs

- la mise en solution dans l'eau (transfert gaz → eau)
- l'action de l'ozone dissous sur le corps à oxyder.

HOIGNÉ a montré (figure 121) que l'action de l'ozone est en réalité double.

L'ozone peut agir par une réaction directe de la molécule d'ozone: ce sont des réactions généralement très sélectives.

L'ozone peut également agir par des espèces secondaires, comme les radicaux OH^0 formés par décomposition de la molécule d'ozone dans l'eau. Cette espèce OH^0 peut réagir avec des composés appelés "scavengers" pour donner des produits de réaction sans action sur l'ozone dissous dans l'eau. L'espèce OH^0 peut aussi réagir avec des solutés M pour donner des radicaux R^0 qui vont, eux, favoriser la décomposition de la molécule d'ozone dans l'eau. La présence d'OH^- permet également la décomposition de la molécule d'ozone. Cette action indirecte ou radicalaire) de l'ozone **est peu sélective,** mais les cinétiques de réaction sont très variables selon les matières à oxyder.

Du fait de ses propriétés oxydantes, l'ozone est également utilisé pour la désinfection des eaux. Son action est rapide et efficace, mais il n'a pas de pouvoir rémanent.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

M soluté
M oxydé soluté oxydé
R^0 Radical libre catalysant la décomposition de l'ozone
S Scavenger
Ø Produit ne catalysant pas la décomposition de l'ozone

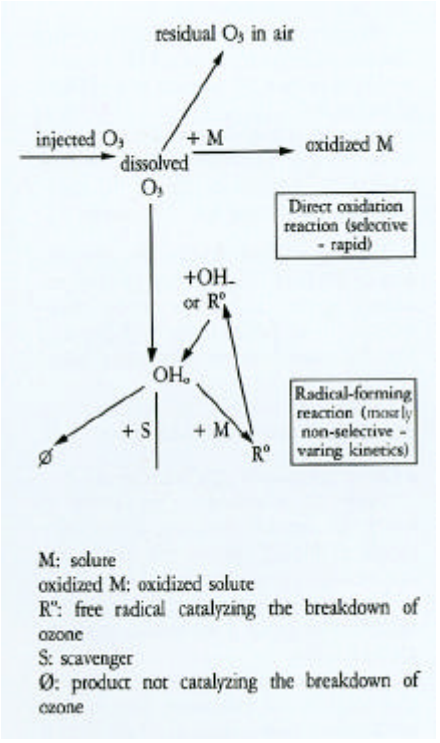


Figure 121. Schéma de 1'action de l'ozone (d'après Hoigné).

- **Ozone et rayonnement U.V**.

En combinaison avec le rayonnement ultraviolet, on peut aboutir à la formation de radicaux OH^0 selon les réactions

$$O_3 + hv \rightarrow O^* + O_2$$
$$O^* + H_2O \rightarrow 2\ OH^0$$

Il y a formation de radicaux OH°. L'action conjointe des rayonnements UV et de l'ozone favorise donc l'action radicalaire de l'ozone.

12.3.2.2. Réactifs liquides

Ce sont principalement certains composés du chlore et l'eau oxygénée (ou peroxyde d'hydrogène).

- **Composés du chlore**

Le dioxyde de chlore a un pouvoir d'oxydation élevé (cf. tableau 40). Il réagit selon la réaction

$$C1O_2 + 5e^- \rightarrow Cl^- + 2\ O^{2-}$$

Il est produit sur le site en utilisant la réaction du chlorite de sodium soit avec le chlore, soit avec l'acide chlorhydrique (cf chapitre 20, § 6.3.2).

Le dioxyde de chlore réagit très lentement avec l'eau

$$2\ ClO_2 + H_2O \rightleftarrows ClO_2^- + ClO_3^- + 2\ H^+$$

I1 est sensible à la décomposition photochimique, selon la réaction de dismutation suivante

$$2Cl0_2 + hv + H_2O \rightarrow C10_3^- + Cl^- + O_2$$

Selon les conditions d'application, le dioxyde de chlore peut conduire soit à une réaction d'oxydation (excès de ClO_2), soit à une réaction de chloration (faible excès de ClO_2).

Si le dioxyde de chlore est parfois intéressant pour l'oxydation de certains produits organiques, il est principalement utilisé, du fait de son pouvoir rémanent, pour la désinfection des eaux potables, en fin de chaire de traitement.

L'eau de Javel: après mise en solution dans l'eau, l'hypochlorite de sodium NaOCl se dissocie en

$$NaOCl \rightleftarrows ClO^- + Na^+$$

Le pH de réaction sera donc prépondérant dans l'action oxydante ou bactéricide de cet oxydant

Chloramines. Les chloramines sont fournies par réaction du chlore sur l'ammonium selon la réaction rappelée plus haut Les chloramines ont un pouvoir

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

bactéricide beaucoup plus faible que les précédents, mais elles sont plus stables et ont donc un effet rémanent intéressant pour les grands réseaux distribuant une eau de température élevée.

- **L'eau oxygénée ou peroxyde d'hydrogène.**

Le peroxyde d'hydrogène est un oxydant fort (cf tableau 40) qui se décompose dans l'eau selon la réaction

$$H_2O_2 + H_2O \rightleftarrows HO_2^- + H_3O^+ \quad (1)$$
$$pK = 11{,}6$$

Cependant, son coût élevé le réserve à des utilisations spécifiques. Comme bactéricide, il peut être employé pour la désinfection de canalisations, sur les circuits de distribution d'eau ultra pure (mise en contact d'une eau contenant plusieurs centaines de milligrammes par litre d'H_2O_2 pendant environ 1 heure). Cet agent oxydant a l'avantage de ne pas provoquer la formation de composés halogénés.

Il est parfois employé pour l'oxydation de composés soufrés responsables de mauvaises odeurs en traitement d'eaux résiduaires.

Il peut être aussi utilisé en combinaison avec d'autres oxydants. Avec l'ozone: la réaction de l'ozone sur le peroxyde d'hydrogène est très lente. L'ozone réagirait avec l'ion HO_2^- de la réaction (1) selon la réaction globale suivante

$20_3 + H_20_2 \rightarrow 20H^0 + 30_2$

On aboutit à la formation de radicaux OH^0 dont l'action a été évoquée plus haut.

12.3.3. Applications

12.3.3.1. Eaux de consommation

- **Désinfection des eaux :** c'est le but premier de l'application des oxydants lors d'un traitement d'eau de consommation.

Les conditions de mise en oeuvre généralement admises sont les suivantes

- chlore: maintien d'un taux de 0,5 $mg.l^{-1}$ de chlore libre pendant un temps de contact d'au moins 30 min à un pH inférieur à 8,
- ozone: maintien d'un taux d'ozone résiduel de 0,4 $mg.l^{-1}$ pendant 4 min,
- dioxyde de chlore: maintien d'un taux de 0,2 $mg.l^{-1}$ pendant 15 min.

Ces conditions permettent d'assurer l'effet bactéricide de ces oxydants. Pour obtenir une bonne désinfection il est par ailleurs indispensable que la turbidité de l'eau soit inférieure à 1 NTU.

L'ozone est particulièrement efficace pour l'élimination des virus (effet virulicide).

- **Autres utilisations possibles**

Le tableau 41 résume les points d'application possibles des différents oxydants couramment utilisés au sein d'une chaîne de production d'eau potable

Les lignes directrices de l'emploi des principaux de ces oxydants sont les suivantes

- **l'ozone** peut avantageusement être utilisé en tout point de la chaîne de traitement. Il n'a cependant pas d'effet rémanent. Il ne permet donc pas d'empêcher le développement d'algues dans les décanteurs et sur les filtres ouverts. Il ne permet pas d'assurer un effet rémanent dans le réseau,
- **le chlore** permet de conserver un taux d'oxydant résiduel après son application: son effet bactériostatique est important. Si le chlore est appliqué en tête de chaîne de traitement, avec un taux supérieur au point critique (cf. figure 119), il permet d'éliminer l'ammonium. Par contre, il conduit à la formation de composés organochlorés qu'il importe d'éviter dans toute la mesure du possible (cf. page 44). Il est donc recommandé

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 41. Mise en oeuvre des oxydants au sein d'une chaîne de traitement

	Air	Cl_2	0_3	ClO_2	Chloramines
Préoxydation	+	(+)	++	(+)	0
Oxydation intermédiaire	+	+	++	(+)	-
Oxydation finale	0	+	+	+	-
Désinfection	0	+	++	+	-
Effet rémanent (Désinfection de sécurité)	0	+	0	+	+

++ :Utilisation recommandée
+ : Utilisation possible
(+) : Utilisation possible avec réserve
- : Utilisation non recommandée
0 : Sans effet ou sans effet appréciable

de reporter l'injection du chlore le plus en aval possible dans la chaîne de traitement,

- **le dioxyde de chlore** est également un excellent bactériostatique. Appliqué en fin de chaîne son taux de traitement doit être limité à 0,4-0,6 $mg.l^{-1}$ sous peine d'apparition de mauvais goût dus à l'ion chlorite qui apparaît après réaction d'oxydoréduction du dioxyde avec les matières organiques. On a en effet la réaction

MO de l'eau + $C10_2$ →

MO oxydées + $C10_2^-$ + Cl^-

Lorsque le dioxyde est appliqué en tête de la chaîne, cette même réaction provoque l'apparition d'une quantité importante de ClO_2^- qu'il n'est pas question de laisser subsister dans l'eau traitée. Elle peut être éliminée soit par ozonation (mais avec formation d'ion chlorate $C10_3^-$), soit par filtration sur CAG (mais avec réduction de la durée de vie du CAG). L'ammonium n'est pas éliminé par le dioxyde de chlore.

A titre indicatif, l'efficacité relative des oxydants vis-à-vis de quelques paramètres est donnée dans le tableau 42.

12.3.3.2. Eaux usées urbaines

En dehors des phases d'oxygénation ayant pour but d'assurer l'oxydation et l'assimilation par voie bactérienne de la matière organique et de l'ammonium, les oxydants chimiques ne sont mis en oeuvre qu'en cas de désinfection, généralement **partielle.**

Alors que la désinfection des eaux de consommation a pour but l'élimination **totale** des germes pathogènes (révélés par les germes test de contamination fécale), la désinfection partielle a pour but de réduire la concentration en germes pathogènes, contrôlée par la réduction du nombre de germes tests de contamination fécale. La réduction recherchée correspond le plus souvent à un abattement de deux ou trois unités logarithmiques.

Les doses utilisées sont évidemment fonction de la qualité de l'effluent. Il y a en particulier intérêt à éliminer le mieux possible les MES avant désinfection (filtration tertiaire).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 42. Efficacité des oxydants

Éléments considéré	Agent d'oxydation utilisable				
	Air	Cl2	C102	0_3	$KMn0_4$
Fer	++	++	++	+++	+
Manganèse	0	+	++	+++	+++
Couleur	0	+	+	++	0
Odeur et goût	+	±	+	+++	0
Ammonium	0	+	0	0	0
Matières organiques	0	+	+	+	0
Substances réductrices	0	++	++	++	+
Biodégradabilité	0	-	-	++	0
Désinfection	0	++	++	++	(+)

12.3.3.3. Application aux eaux et effluents industriels

Elle concerne principalement les eaux et effluents industriels suivants.

- **A partir de réactifs oxydants**

- eaux cyanurées de galvanoplastie ou de lavage de gaz,
- condensats chargés d'hydrazine : oxydation par H_2O_2 catalysée sur résines spécifiques,
- bains de nitrites en galvanoplastie oxydation par H_2O_2 + Cu^{++} (réactif de Fenton), NaClO ou $H_2 SO_5$),
- solutions de thiosulfates oxydables à partir de H_20_2

- **A partir d'air ou d'oxygène**

- soudes usées, riches en S^{2-},
- eaux de décapage chargées de Fe^{2+},
- lixiviats d'uranium U^{4+},

La plupart de ces réactions présentent un saut de potentiel assez élevé et une cinétique assez rapide pour permettre une régulation, sauf dans le cas des thiosulfates. S'il y a coprésence d'autres réducteurs moins dangereux, on se contente d'un contrôle a posteriori qui limite la surconsommation d'un oxydant coûteux (cas des eaux cyanurées de lavage de gaz).

La mise en oeuvre d'air et d'oxygène dans des appareils appelés "oxidisers" exige, pour obtenir des cinétiques et des rendements suffisants, d'être effectuée à des conditions élevées de température et de pression.

- **A partir d'ozone**

- effluents contenant de faibles concentrations en CN ou en phénols,
- effluents d'unités Méthionine, ou contenant des composés réfractaires.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Exemple d'oxydation. Traitement des cyanures:**

L'oxydation des cyanures en milieu alcalin comporte théoriquement deux stades successifs, à l'état de cyanates de toxicité pratiquement nulle, puis à l'état d'azote et bicarbonate. Les oxydants forts utilisés sont l'hypochlorite de sodium, le chlore, l'acide monopersulfurique (acide de Caro). Pratiquement, seul le premier stade est mis en ceuvre, pour des raisons économiques.

1er stade (cyanates)

Les réactions globales mises enjeu sont

- avec l'hypochlorite de sodium

$NaCN + NaClO \rightarrow NaCNO + NaCl$

- avec le chlore gazeux

$NaCN + C1_2 + 2\ NaOH \rightarrow NaCNO + 2\ NaCI + H_2O$,

- avec l'acide de Caro

$NaCN + H_2SO_5 \rightarrow NaCNO + H_2SO_4$

Les deux premières réactions sont pratiquement instantanées pour des pH supérieurs à 12, mais la vitesse de réaction diminue rapidement lorsque le pH descend (seuil critique: pH 10,5). Quelque soit le pH, un composé intermédiaire formé est le chlorure de cyanogène CNCI, aussi dangereux que l'acide cyanhydrique $NaCN + NaClO + H_2O, \rightarrow CNCI + 2\ NaOH$

Mais à partir du pH 10,5, le chlorure de cyanogène est hydrolysé dès sa formation, selon la réaction

$CNCI + 2\ NaOH \rightarrow NaOCN + H_2O$,

Avec l'acide de Caro, on observe une vitesse de réaction suffisante pour un pH supérieur à 9,5.

2e stade (azote)

Le passage du cyanate à l'azote s'effectue selon la réaction

$2\ NaCNO + 3\ Cl_2 + 6\ NaOH \rightarrow 2\ NaHCO_3 + N_2 + 6\ NaCl + 2\ H_2O$,

Il se fait au même pH de 12, mais nécessite l'emploi de trois fois plus de réactif et d'un temps de réaction de l'ordre de l'heure, la régulation de potentiel n'étant pas possible.

Le tableau 43 donne les quantités de réactifs nécessaires pour oxyder jusqu'au stade cyanate un gramme de CN^- présent dans un effluent préalablement amené au pH optimal de réaction.

Tableau 43. Oxydation des cyanures libres

Réactifs	**Stoechiométrie** pour 1 g de CN	**Pratique industrielle** pour 1 g de CN
NaClO en ml (1)	18,2	21 (3)
H_2SO_4 en ml (2)	22	24 (3)
NaOH en g	3,1	3,5 (3)

(1) NaClO, solution commerciale à 47-50 degrés chlorométriques, soit 150 $g.l^{-1}$ de chlore actif.

(2) H_2SO_5, solution commerciale à 200 $g.l^{-1}$.

(3) Excès normal pour les concentrations en cyanure< 100 $mg.l^{-1}$ (cas des eaux de rinçage).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

12.4 RÉDUCTION PAR VOIE CHIMIQUE

Les exemples les plus fréquents sont la réduction de l'oxygène, celle du chrome hexavalent, ainsi que la destruction des oxydants résiduels utilisés en désinfection. Il faut aussi citer la réduction des nitrites en traitement de surface (acide sulfamique ou $NaHS0_3$).

12.4.1. Réduction chimique de l'oxygène

On emploie du sulfite de sodium ou du bisulfite d'ammonium qui, bien que plus cher, est de mise en oeuvre plus simple et présente un effet tampon plus large. Les réactions mises en jeu sont:

- **Avec sulfite de sodium**

$O_2 + 2\ Na_2SO_3 \rightarrow 2\ Na_2SO_4$

Il faut 16 g de Na_2SO_3, 7 H_2O par mg d'oxygène.

- **Avec bisulfite d'ammonium**

$1/2\ O_2 + NH_4\ HSO_3 \rightarrow HNH_4SO_4$

Il faut 6,2 mg de bisulfite par mg d'oxygène.

Trois applications sont fréquentes : traitement de chaudières, conditionnement de circuits fermés de refroidissement et conditionnement des eaux en récupération secondaire.

12.4.2. Réduction du chrome hexavalent

La réduction du chrome hexavalent toxique en chrome trivalent moins toxique et précipitable sous forme d'hydroxyde s'effectue en milieu acide par action du bisulfite de sodium ou du sulfate ferreux.

- **Avec le bisulfite de sodium**

$H_2Cr_2O_7 + 3\ NaHSO_3 + 3\ H_2SO_4$
$\rightarrow Cr_2\ (SO_4)_3 + 3\ NaHSO_4 + 4\ H_2O$

- **Avec le sulfate ferreux**

$H_2Cr_2O_7 + 6\ Fe(SO_4) + 6\ H_2S0_4$
$\rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + 3\ Fe_2(S0_4)_3 + 7\ H_2O$

La première de ces réactions est pratiquement instantanée pour des pH inférieurs à 2,5, mais la vitesse de réaction diminue rapidement lorsque le pH augmente (seuil critique pH 3,5).

La réduction au fer ferreux est plus tolérante et peut être effectué à pH inférieur à 6; avec régulation. Elle est moins employée à cause de la production importante de boues d'hydroxydes au stade de la neutralisation finale.

Le tableau 44 donne les quantités de réactifs nécessaires pour la réduction de 1 g de $Cr_{(vI)}$.

12.4.3. Réduction du chlore résiduel en désinfection

Elle peut être nécessaire à l'extrémité d'une conduite de transport d'eau potable sur une grande distance, ou dans le cas de rejet en zone sensible d'ERU ayant été chlorée. Les agents les plus fréquemment utilisés sont Na_2HS0_3 et $S0_2$ qui agissent selon les réactions suivantes:

$SO_2 + HOCI + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + HCl$
$NaHSO_3 + HOCI \rightarrow H_2SO_4 + NaCl$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 44. Traitement du chrome hexavalent

Réactifs	**Stoechiométrie** pour 1 g de Cr(vi)	**Pratique industr**ielle pour 1 g de Cr(vi)
$NaHSO_3$ en ml (1)	5,7	6,5 (2)
H_2SO_4 en g	0,95	1
$FeSO_4$, 7 H_2O, en g	16	20 (2)
H_2SO_4 en g	1,90	2

(1) $NaHSO_3$, solution commerciale à 530 $g.l^{-1}$ d: 1,33.
(2) Excès normal pour le traitement d'eaux de rinçage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

f

13. NEUTRALISATION - REMINÉRALISATION

Les traitements de correction de pH, souvent désignés par le terme de neutralisation, qui consistent à ramener le pH d'une eau à une valeur définie, peuvent concerner les domaines d'application suivants

- neutralisation d'effluents divers à un pH souvent voisin de la neutralité avant rejet dans le milieu naturel: effluents industriels acides ou alcalins, eaux acides d'exhaure de mine...,
- correction du pH avant un stade de traitement ultérieur biologique ou physico-chimique (ajustement du pH de floculation par exemple),
- correction de l'équilibre calco-carbonique pour protéger les conduites de distribution contre la corrosion ou l'entartrage.

Ce dernier point sera plus particulièrement développé car il constitue une étape importante du traitement des eaux potables et industrielles.

En effet, les eaux bicarbonatées calciques suffisamment oxygénées et en équilibre calco-carbonique ont la propriété de provoquer à froid, la formation d'une couche protectrice naturelle, dite couche de Tilhmans, (voir page 425). Les conditions pratiques de formation de cette couche peuvent imposer tout ou partie des traitements de correction suivants :

- aération,
- neutralisation de l'acidité carbonique jusqu'à l'obtention du pH d'équilibre pour les eaux agressives ou au contraire acidification (ou vaccination des eaux incrustantes, - reminéralisation des eaux dépourvues de bicarbonate de calcium.

En l'absence des conditions de formation de la couche protectrice carbonatée, la protection des canalisations de distribution peut également être assurée

- contre la corrosion, par un traitement filmogène à base d'inhibiteurs de corrosion, - contre l'entartrage, notamment dû à d'autres sels que le carbonate de calcium, par un conditionnement chimique de l'eau (formation de complexes solubles) en dehors des techniques de précipitation, d'échange d'ions ou de déminéralisation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

13.1. L'ÉQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE

Les eaux naturelles ne sont en fait pas pures et contiennent différents éléments chimiques dissous dont le plus fréquent est le bicarbonate (ou hydrogénocarbonate) de calcium.

L'équilibre pratique de ce sel avec le dioxyde de carbone est régi par des lois assez complexes et son déplacement peut créer des réactions chimiques de dissolution de carbonate de calcium (ou agressivité) ou de précipitation de carbonate de calcium (ou entartrage) qui peuvent se superposer aux réactions simples électrochimiques de corrosion qui sont spécifiques des métaux.

13.1.1. Étude générale de l'équilibre -notions d'agressivité et de corrosivité

Toutes les études de l'équilibre calcocarbonique reposent sur les relations suivantes

- égalité des charges électriques positives P et négatives N

$$\underbrace{H^+ + 2\,Ca^{2+} + 2\,Mg^{2+} + Na^+ + K^+ + \dots}_{P} = \underbrace{OH^- + HCO_3^- + 2\,CO_3^{2-} + Cl^- + NO_3^- + 2\,SO_4^{2-} + \dots}_{N} \quad (1)$$

– dissociation de l'eau :

$$(H^+)\,(OH^-) = pK'_e = pK_e - \varepsilon \quad (2)$$

– équilibre de l'eau et de H_2CO_3 :

$$(H^+)\,(HCO_3^-) = K'_1\,(H_2CO_3) \text{ avec } pK'_1 = pK_1 - \varepsilon \quad (3)$$

$$(H^+)\,(CO_3^{2-}) = K'_2\,(HCO_3^-) \text{ avec } pK'_2 = pK_2 - 2\varepsilon \quad (4)$$

- produit de solubilité du $CaCO_3$:

$$(Ca^{2+})\,(CO_3^{2-}) = K'_S \text{ avec } pK'_s = pK_s, \_\ 4e \quad (5)$$

Les ions H^+, OH^-, HCO_3^- , CO_3^{2-}, Ca^{2+} et l'acide carbonique sont les **paramètres fondamentaux** de l'équilibre calco-carbonique. Les ions N et P qui jouent essentiellement sur la force ionique de la solution sont des paramètres secondaires vis-à-vis de l'équilibre et sont définis par Legrand et Poirier comme les **éléments caractéristiques.**

La température est également un facteur important qui influe sur la valeur des constantes de dissociation.

Le terme s dépend de la force ionique μ de la solution selon l'équation

$$\varepsilon = \frac{\mu}{1 + 1{,}4\ \sqrt{\mu}}$$

et on définit la force ionique μ exprimée en moles par litre par la relation

$$\mu = \frac{1}{2} \lesssim C_i\, z_i^2$$

C_i et z_i sont respectivement les concentrations en moles par kg et les valences des différents ions présents dans la solution.

A partir des équations précédentes, le **pH d'équilibre ou de saturation pHs** peut être calculé en remplaçant dans (équation (4) d'une eau à l'équilibre la valeur de CO_3^{2-} par celle tirée de l'équation (5)

$$(H^+) = \frac{K'_2}{K'_s}\,(HCO_3^-)\,(Ca^{2+})$$

soit

$$pHs = pK'_2 - pK'_s - \log (Ca^{2+}) - \log (HCO_3^-) \quad (6)$$

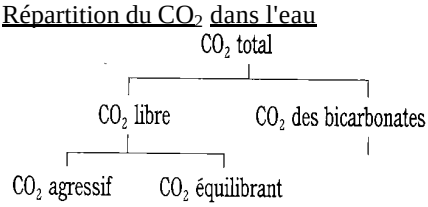
Il faut donc que pH = pHs pour que l'eau soit indifférente au calcaire et par conséquent qu'elle n'attaque pas les parois des citernes, des réservoirs ou des canalisations. La concentration de CO_2 qui correspond exactement au pHs est appelée CO_2 équilibrant.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le pHs correspond au pH d'équilibre de l'eau considérée pour des teneurs identiques en bicarbonates et en calcium c'est-à-dire le pH d'équilibre atteint par addition ou évasion de gaz carbonique.

Si le pH est inférieur à pHs, l'eau a tendance à dissoudre le calcaire et à attaquer le ciment, le béton, etc. Il y a également impossibilité de former la couche protectrice carbonatée sur les canalisations métalliques du fait de la redissolution du $CaCO_3$ au fur et à mesure de sa précipitation. Une telle eau est dite **agressive;** la valeur trop basse du pH est due à un excès de gaz carbonique que l'on appelle CO_2 agressif; la teneur totale en CO_2 dissous est donc dans ce cas, égale à la somme CO_2 équilibrant + CO_2 agressif. C'est cet excès de CO_2 qu'il faut éliminer ou transformer au cours des traitements appelés traitements de neutralisation.

Répartition du CO_2 dans l'eau



Si le pH est supérieur à pHs, l'eau à tendance à précipiter du calcaire au contact de germes de $CaCO_3$ et elle est dite **incrustante** ; dans ce cas, sa teneur en CO_2 libre est inférieure à la valeur théorique du CO_2 équilibrant. On lutte contre l'entartrage soit en abaissant le pH pour le ramener à la valeur d'équilibre soit en pratiquant un traitement d'adoucissement ou de décarbonatation (voir page 146).

Le réglage du pH d'équilibre est donc une condition nécessaire mais non suffisante pour éviter les corrosions dans certains cas.

13.1.2. Méthodes de calcul de l'agressivité - Représentations graphiques

Dans la pratique, il est intéressant d'étudier l'évolution des six éléments H^+, OH^-, CO_3^{2-}, HCO_3^-, Ca^{2+} et H_2CO_3 et de représenter ces évolutions sur des graphiques. On prend deux éléments fondamentaux quelconques comme coordonnées et on choisit le graphique qui permet de construire, de façon simple, les courbes représentatives des divers éléments calco-carboniques contenus dans les eaux à partir des équations fondamentales de l'équilibre.

Selon les variables retenues, il existe un grand nombre de diagrammes parmi lesquels on peut citer les plus utilisés.

13.1.2.1. Méthode de Langelier

A partir de l'équation générale (6) de calcul du pHs, Langelier a établi un graphique de calcul faisant intervenir l'alcalinité et le calcium exprimés en $mg.l^{-1}$ $CaCO_3$, la salinité totale (extrait sec en $mg.l^{-1}$) qui influe, par l'intermédiaire de la force ionique, sur la valeur des coefficients apparents de dissociation des équilibres et la température.

Le pHs se calcule à partir du diagramme (cf. figure 122) par la relation

$pHs = C + pCa + pAlc$ avec $C = pK'_2 - pK'_s$

Langelier a aussi établi un indice Is, **indice de saturation,** égal à la différence entre le pH mesuré d'une eau considérée et son pHs calculé

$$Is = pH - pHs$$

Si pH < pHs, Is est négatif et l'eau est agressive.

Si pH > pHs, Is est positif et l'eau est incrustante.

Cette résolution tient compte de la salinité jusqu'à environ 3 $g.l^{-1}$ et de la tempé-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

rature, mais ne permet pas le calcul des doses de réactifs de neutralisation.

Pour les eaux saumâtres et surtout pour l'eau de mer, on utilise la correction proposée par Stiff et Davis dans le calcul de pHs (cf. figure 123). $pHs = K + pCa + pAlc$ avec $K = pK'_2 - pK'_s$

13.1.2.2. Méthode d'Hallopeau et Dubin

Ces auteurs ont établi une méthode graphique permettant de caractériser quantitativement l'agressivité au calcaire d'une eau et de calculer les quantités de réactifs de neutralisation, en exprimant le pH d'équilibre en fonction des logarithmes de l'alcalinité (mesurée par le TAC et exprimée en moles.l^{-1}) et de la dureté calcique (en moles.l^{-1})

$$pHs = \log K'_s - \log K'_2 - \log (Alc) - \log (Ca^{2+}) + \log p$$

où $$p = 1 + \frac{2\,K'_2}{(H^+)}$$

Dans ce graphique (cf. figure 124), CO_2 libre et pH d'équilibre sont alors représentés par deux familles de droites parallèles.

Connaissant le pH et l'alcalinité d'une eau, on peut déterminer le CO_2 libre. Le graphique met en évidence les courbes de dissolution physique du CO_2 et les courbes de neutralisation par la chaux et par le calcaire.

La figure 124 bis donne l'exemple d'une eau dont le point représentatif M, défini par ses coordonnées (TAC, pH), est situé en zone agressive: pour qu'elle soit amenée à l'équilibre, 3 voies sont possibles

- n° 1: évasion de CO_2 par aération; le TAC et le calcium restent inchangés; le pH d'équilibre correspond alors au pHs de l'eau initiale,
- n° 2 : neutralisation par une base (soude ou chaux) ; il y a augmentation du TAC et, si on emploie de la chaux, du calcium dans la même proportion,
- n° 3 : neutralisation par un carbonate alcalin Na_2CO_3 ou alcalino-terreux ($CaCo_3$) ; le TAC et éventuellement (dans le cas du $CaCO_3$) le calcium augmentent d'une quantité environ 2 fois plus forte que dans le cas précédent.

On peut constater que, d'une part, le pH d'équilibre est différent dans les 3 cas étudiés et que, d'autre part, il est d'autant plus faible que le TAC final est plus élevé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

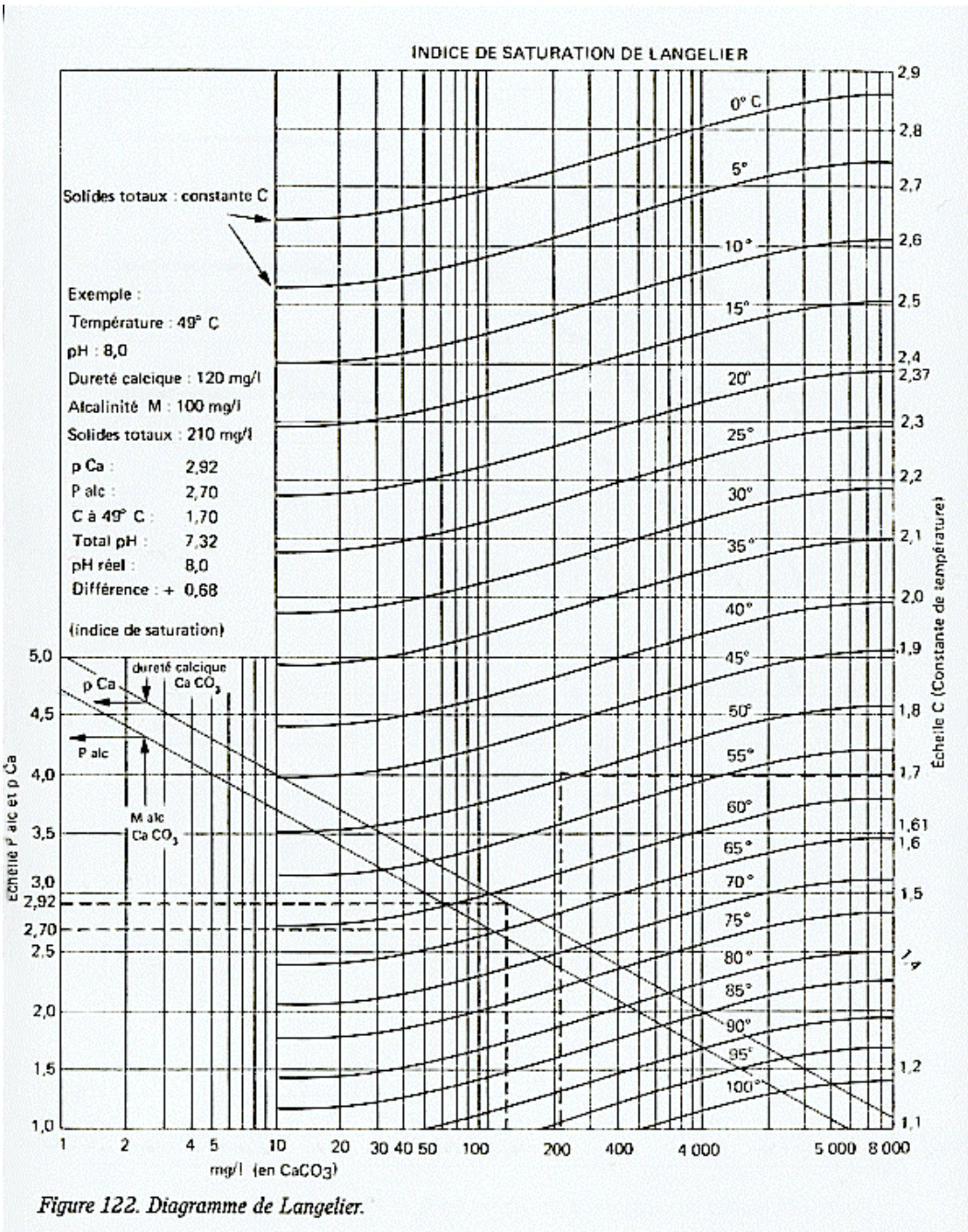


Figure 122. Diagramme de Langelier.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

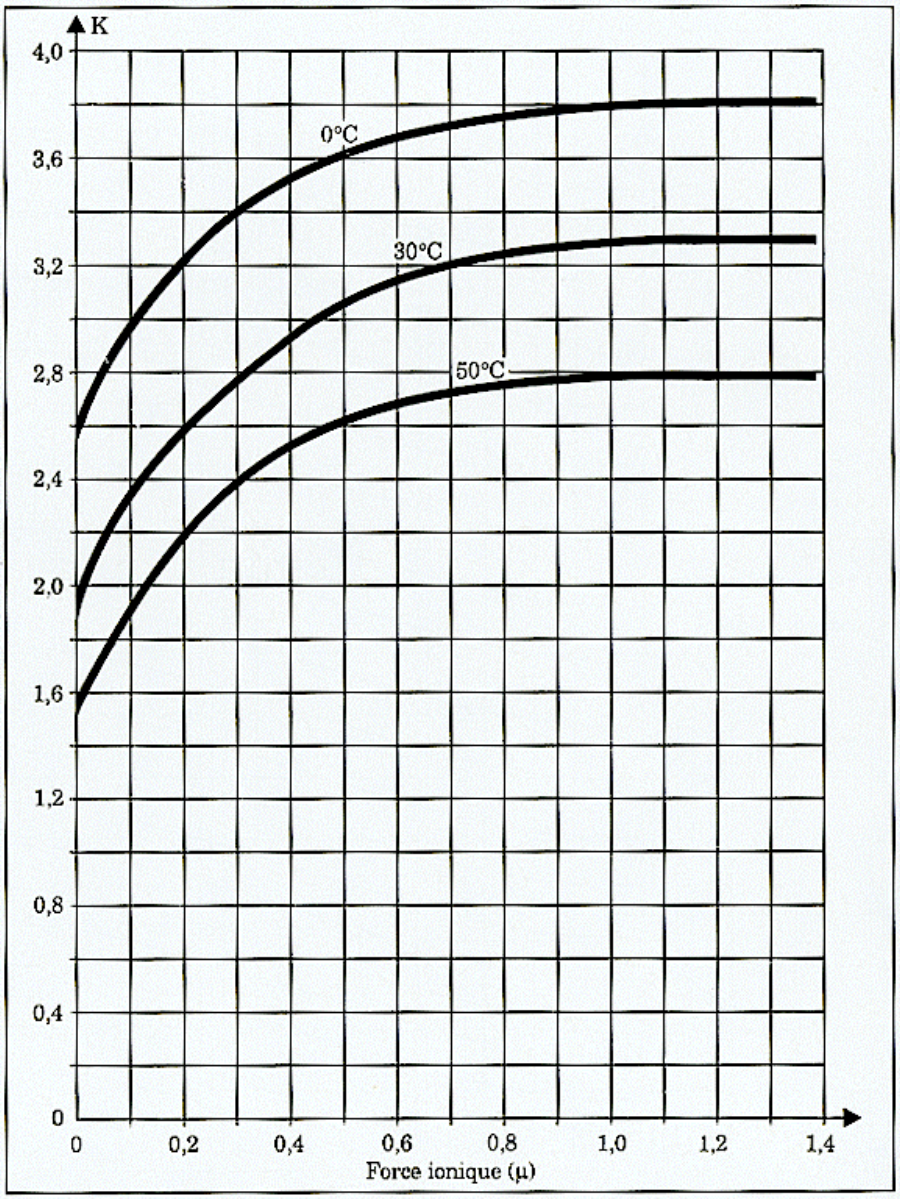


Figure 123. Valeur du coefficient K de Stiff et Davis en fonction de la force ionique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

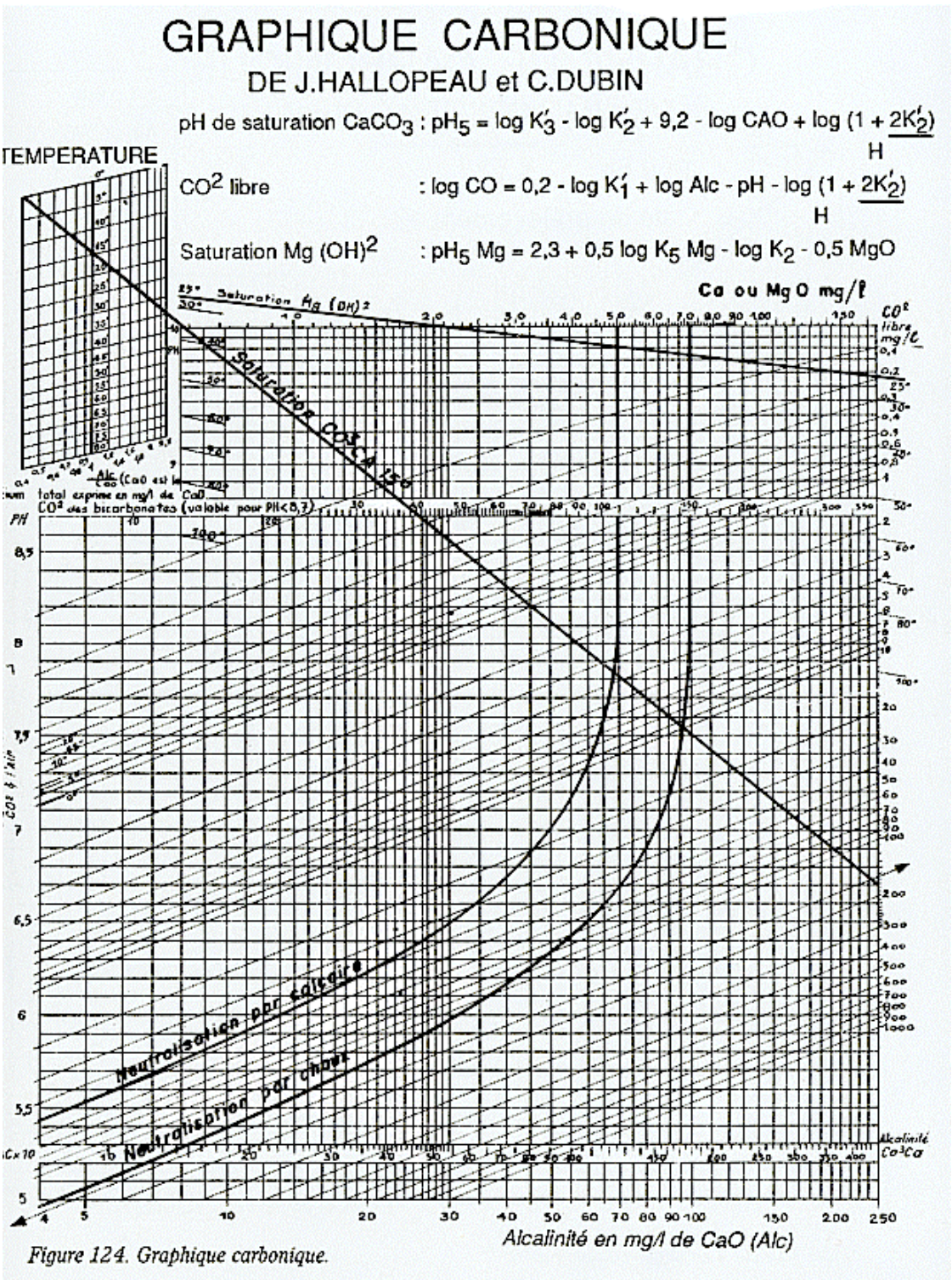


Figure 124. Graphique carbonique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

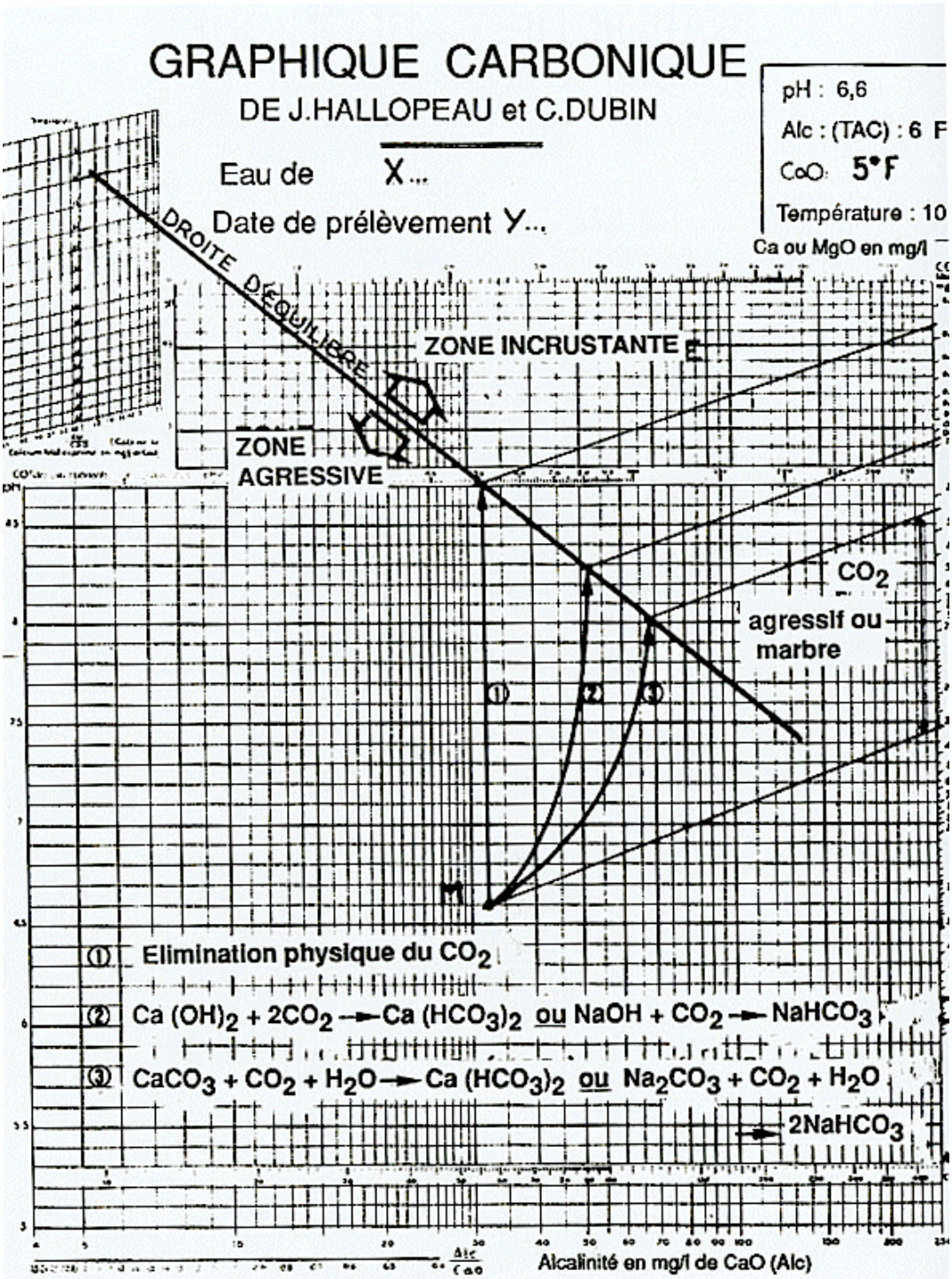


Figure 124 bis. Graphique carbonique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans les cas n° 2 et 3, la différence entre TAC final et TAC initial permet de déterminer la quantité de réactif alcalin à mettre en oeuvre après évaluation du déplacement de la droite d'équilibre lié à la variation du rapport alcalinité/calcium au cours de la neutralisation.

Bien qu'introduisant les notions de duretés calcique et totale, cette méthode ne considère pas la salinité totale ni les eaux alcalines et concerne surtout les eaux faiblement à moyennement minéralisées.

13.1.2.3. Méthode de Legrand et Poirier

Ces auteurs ont considéré le système de coordonnées (Ca^{2+}) en abscisse et CO_2 total en ordonnée (cf. figure 125).

Ils justifient ce choix par les avantages qui en découlent: les échelles sont arithmétiques (en principe en millimoles.l^{-1}), ce qui permet d'éviter le rejet des origines à l'infini; les concentrations de tous les éléments fondamentaux y apparaissent immédiatement; les déplacements du point figuratif de l'eau s'y effectuent pratiquement toujours suivant des

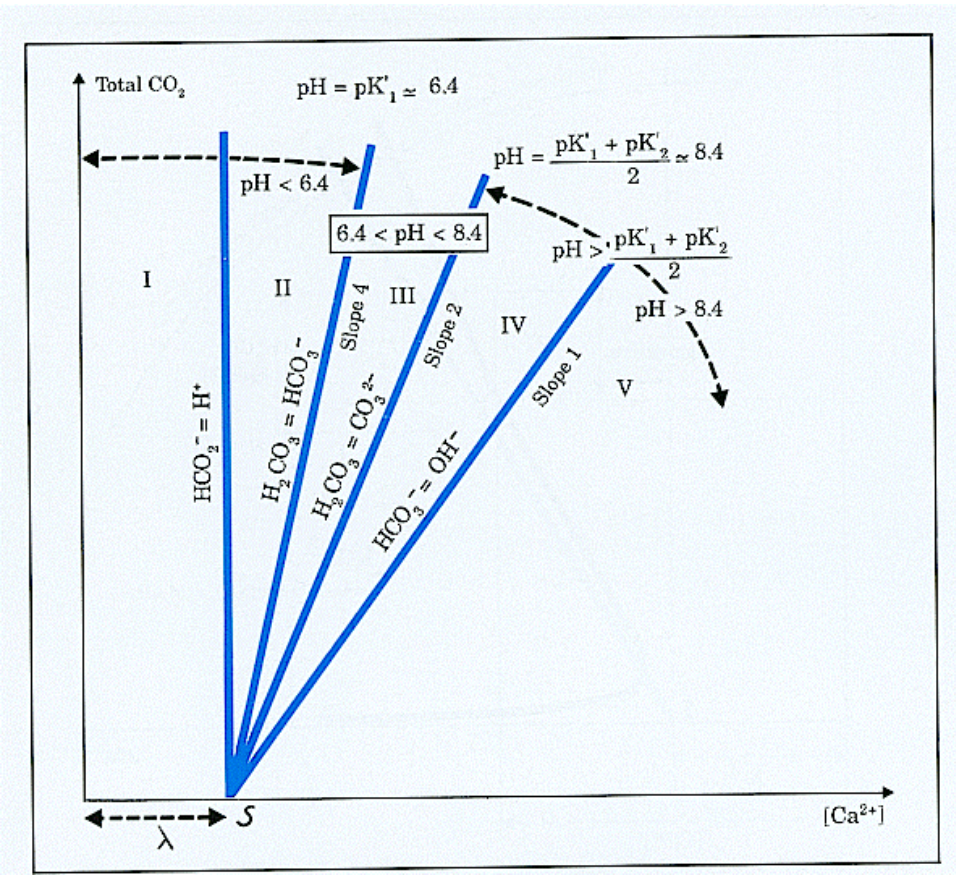


Figure 125. Délimitation des différentes régions du plan (exemple pris pour une eau à 20°C

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

droites ou suivant la courbe d'équilibre; enfin, la pratique d'un traitement se traduit sur ce graphique soit par un déplacement du point figuratif, soit par une modification de la courbe d'équilibre, soit par les deux à la fois.

En posant $\frac{N \cdot P}{2} = \lambda$

la relation de neutralité électrique (1) devient: $(H\ CO_3^-) = 2\ [(Ca^{2+}) - ?] - 2\ (CO_3^{2-}) - (OH^-) + (H^+)$ et, en ajoutant à chaque membre l'expression $(H_2CO_3) + (CO_3^{2-})$

CO_2 total =

$2\ [(Ca^{2+}) - ?] + (H_2CO_3) - (CO_3^{2-}) - (OH^-) + (H^+)$

En adoptant les coordonnées exposées plus haut, on obtient un graphique dont le plan est divisé en régions limitées par les principaux cas particuliers (correspondant à la famille de courbes pH = constante, qui est une famille de droites concourant au point S d'abscisse ?): la figure 12 5 montre quelles sont ces régions; on peut voir qu'en pratique, la quasi totalité des eaux naturelles (avant

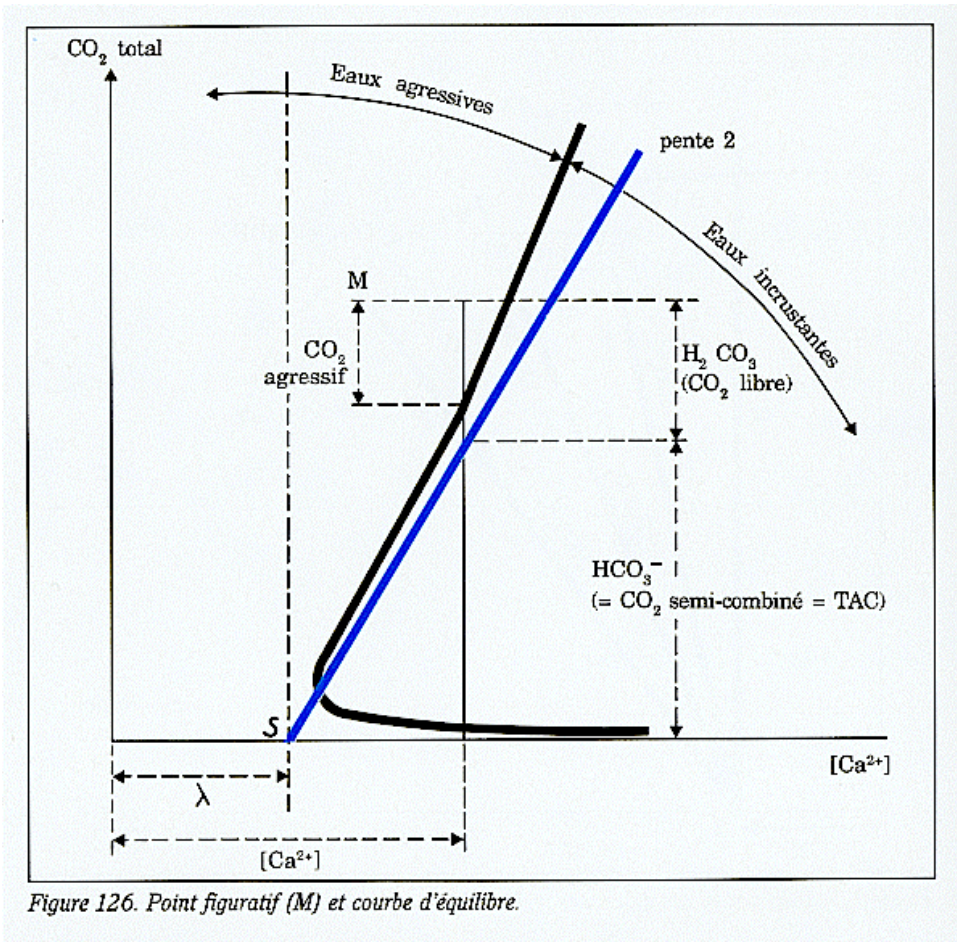


Figure 126. Point figuratif (M) et courbe d'équilibre.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ou après traitement) est comprise dans la région III, c'est-à-dire entre la droite de pente 4 (qui correspond à pH = pK', = environ 6,4 à 2 0 °C) et la droite de pente 2 qui correspond à

$$pH = \frac{pK'_1 + pK'_2}{2} = \text{environ } 8{,}4 \text{ à } 20\ ^\circ C.$$

La courbe sur laquelle figurent toutes les eaux à l'équilibre calco-carbonique, pour des valeurs données de la température et du paramètre a, est du type représenté sur la figure 126 ; cette figure donne, en outre, l'exemple du point figuratif M d'une eau donnée, supposée agressive, avec sa position par rapport à la courbe d'équilibre et les renseignements que l'on peut en tirer vis-à-vis des caractéristiques de l'eau (en particulier, proportion de CO_2 agressif dans la teneur totale en CO_2 libre).

L'exploitation du graphique permet de prévoir l'évolution du système dans tous les cas de figure possibles (avec indication des doses de réactifs le cas échéant) sans ou avec modification de la courbe d'équilibre.

La méthode de Legrand et Poirier est pratiquement la seule qui permette d'obtenir des résultats rigoureux, mais elle entraîne de longs calculs; néanmoins, son application a été simplifiée et généralisée par l'utilisation de la micro-informatique.

13.2. MISE A L'ÉQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE

Il faut d'abord rappeler pour mémoire qu'il est parfois possible de corriger le pH par des procédés physiques d'échange gaz-liquide.

En particulier les procédés d'élimination physique de gaz carbonique par aération sont décrits dans le sous-chapitre 14 et on ne considère ici que les cas où on réalise une réaction chimique dans l'eau à traiter.

13.2.1. Addition de réactifs

13.2.1.1. Neutralisation par addition de réactifs alcalins ou alcalino-terreux

Dans le cas d'eaux destinées à l'alimentation humaine, les réactifs les plus couramment utilisés sont la soude, la chaux ou le carbonate de sodium. Les réactions de neutralisation du CO2 agressif sont alors les suivantes

$$2\ CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2$$

$$CO_2 + NaOH \rightarrow NaHCO_3$$

$$CO_2 + Na_2CO_3 + H_2O \rightarrow 2\ NaHCO_3$$

Ces mêmes produits sont employés dans le traitement d'eaux industrielles, qui fait en outre appel à d'autres réactifs spécifiques

- la lithine dans l'industrie nucléaire,
- les amines neutralisantes (ammoniaque, cyclohexylamine, éthanolamine, morpholine, etc.) dans les eaux d'alimentation de chaudières: lors de la condensation de la vapeur, elles se combinent avec l'acide carbonique dissous pour former un bicarbonate d'amine; les coefficients de partage du CO_2 entre les phases vapeur et eau sont tels que les doses d'emploi peuvent être très inférieures aux quantités stoechiométriques calculées à partir du CO_2 effectivement libéré en chaudière; à basse et moyenne pression, la dose est de l'ordre de 1 g par g de CO_2 libéré; à haute pression, après dégazage thermique, les doses sont d'environ 1 g par m^3 d'eau,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- le carbonate de calcium en poudre en neutralisation d'ERI.

Avec l'acide carbonique, ces réactifs donnent naissance à des bicarbonates. Avec les acides forts de certains effluents industriels, on obtient des sels neutres.

En raison de son bas prix, c'est la chaux qui est le réactif le plus fréquemment utilisé dans les cas classiques. Lorsqu'on utilise la chaux pour l'ajustement final du pH d'une eau potable, il y a intérêt à utiliser un saturateur de chaux qui retient les impuretés (incuits) et fournit une eau de chaux limpide, alors qu'un lait de chaux confère toujours à l'eau une turbidité dont l'intensité dépend du degré de pureté du produit commercial et de la dose de chaux nécessaire.

Tous les traitements de neutralisation doivent être soigneusement contrôlés; il est souvent souhaitable d'asservir le dosage de réactif au pH résultant dans l'eau traitée. L'efficacité du traitement dépend aussi de la qualité du mélange du produit neutralisant avec l'eau à traiter il convient donc de réaliser une bonne homogénéisation dans des enceintes de réaction munies d'agitateurs.

Ce type de neutralisation dans les stations de traitement d'eau potable est effectué
- soit en fin de traitement,
- soit partiellement en tête de traitement (ajustement du pH de floculation par exemple) avec complément en fin de chaîne,
- soit, plus rarement, entièrement à l'entrée de l'installation (en particulier, dans certains cas de déferrisation-démanganisation).

13.2.1.2. Acidification

Les principales applications de cette technique sont les suivantes: correction des eaux incrustantes, vaccination des circuits industriels, prétraitement avant dessalement, neutralisation d'effluents alcalins et ajustement du pH après adoucissement à la chaux.

Lorsqu'on met en ceuvre du CO_2, l'installation comporte: tanks ou bouteilles de stockage, mesure de débit gazeux, tour de dissolution. Dans les autres cas, on utilise surtout l'acide sulfurique, parfois l'acide chlorhydrique qui sont distribués par pompes doseuses.

13.2.1.3. Neutralisation réciproques

Dans certains cas particuliers, on peut se passer de réactif chimique en faisant réagir les unes sur les autres deux ou plusieurs eaux de caractères opposés
- eaux agressives et eaux incrustantes (un appoint de réactif reste néanmoins souvent nécessaire pour atteindre exactement les conditions d'équilibre calco-carbonique),
- effluents acides et effluents alcalins (traitement de surfaces par exemple).

On peut aussi inclure dans cette catégorie les cas où l'on fait alterner des eaux acides et des eaux alcalines sur des résines carboxyliques.

13.2.2. Filtration surproduits alcalino-terreux

Ce type de traitement, qui utilise des produits à base de carbonate de calcium éventuellement mélangé à du carbonate de magnésium (dolomie) ou à de la magnésie, s'applique le plus souvent à la neutralisation du gaz carbonique agressif ; ce dernier, au cours de la filtration, donne naissance à des bicarbonates.

La matière filtrante utilisée a longtemps été le marbre. Toutefois, sa faible vitesse de réaction lui fait préférer d'autres produits connus sous les noms commerciaux de Neutralité, Neutralg, Magno,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Akdolit, etc., dont la cinétique de réaction permet d'obtenir une totale efficacité avec une masse de contact relativement réduite.

Certains des produits disponibles sur le marché ont été calcinés lors de leur préparation: ils contiennent alors une forte proportion d'oxydes alcalino-terreux et confèrent à l'eau traitée, lors de leur mise en service, une très forte alcalinité qui décroît ensuite progressivement avec le temps.

La Neutralité et le Neutralg exempts de bases libres, né présentent pas ces défauts et sont stables dans le temps. Ils se présentent sous forme de grains calibrés de diverses granulométries et sont composés de carbonates de calcium et magnésium; leur structure spéciale leur confère une solubilité rapide et constante, toujours proportionnelle à la quantité de CO_2 à neutraliser.

La filtration sur produits alcalino-terreux est très souvent appliquée sur les eaux profondes qui ne demandent pas d'autre traitement, alors que l'addition de produits en suspension ou en solution est en général intégrée à une chaîne de traitement complet (déferrisation-démanganisation des eaux profondes, clarification des eaux de surface, etc.).

Ce procédé ne permet cependant pas un dépassement du pH d'équilibre pour accélérer la formation de la couche protectrice ce qui implique éventuellement une injection complémentaire d'un réactif alcalin.

13.2.3. Consommation de réactifs pour les corrections d'acidité carbonique

Réactif	**Consommation de produit pur** par g de CO_2 agressif	**Augmentation de dureté par g de CO, agressif, en °F**
Chaux	0,84 g de $Ca(OH)_2$ (0,85 à 1 g de produit commercial)	0,11
Soude	0,91 g de NaOH	0
Carbonate de sodium	2,4 g de Na_2CO_3	0
Marbre	2,3 g de $CaCO_3$	0,23
Magnésie	0,45 g de MgO	0,11
Neutralite	2 à 2,2 g	0,23

13.3. REMINÉRALISATION

13.3.1. But

La reminéralisation a pour effet d'augmenter le TAC et/ou le TCa. On parle aussi de recarbonatation. Son but est le plus souvent de permettre la formation de la couche protectrice à l'intérieur des conduites. Il peut être aussi de répondre à des exigences de qualité d'eau de fabrication ou encore d'améliorer les qualités organoleptiques (et sanitaires) de certaines eaux de consommation (eaux de bouilleurs).

Cette étape de traitement est habituellement envisagée en fin de chaîne (eaux souterraines douces ou eaux ayant subi un traitement de dessalement). Il peut être également intéressant de réaliser cette étape de traitement en tête de chaîne, pour les eaux de surface douces et colorées nécessitant un traitement complet de clarification, ce qui permet un meilleur contrôle du pH de floculation et éventuellement une amélioration de la qualité de la floculation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

13.3.2. Mise en œuvre

Pour obtenir le TAC et le TCa recommandés, plusieurs procédés sont applicables en fonction de la qualité initiale de l'eau, de la taille de l'installation et des produits de traitement disponibles localement.

13.3.2.1. Gaz carbonique et chaux

C'est le procédé le plus utilisé quand la qualité de l'eau nécessite une augmentation simultanée du TAC et du calcium sur les installations moyennes et grandes.

Par degré de TAC et par m3 d'eau il faut 8,8 g de CO_2 + 5,6 g de CaO ou 7,4 g de $Ca(OH)_2$

Le gaz carbonique est généralement introduit dans une tour de contact, à travers des diffuseurs poreux, sous une charge de plusieurs mètres de hauteur d'eau. Dans le cas d'eaux industrielles, le CO_2 peut être prélevé sur l'échappement de moteurs ou dans une cheminée, et éventuellement lavé dans une colonne à ruisellement. Des brûleurs immergés peuvent aussi assurer la combustion d'un hydrocarbure liquide ou gazeux au sein même du liquide.

Les quantités de combustible nécessaires à la production de 1 kg de CO_2 sont: coke 350 g, fioul 450 g. Mais seul l'emploi de CO_2 liquide du commerce permet d'être assuré d'une meilleure pureté du produit (cas des eaux potables).

La chaux doit être préparée dans un saturateur sous forme d'eau de chaux lorsque la reminéralisation se pratique sur une eau claire en fin de chaîne de traitement En fonction du TAC initial de l'eau à traiter, il est parfois préférable d'injecter la chaux après le gaz carbonique pour éviter le phénomène de décarbonatation de l'eau au point d'injection de la chaux.

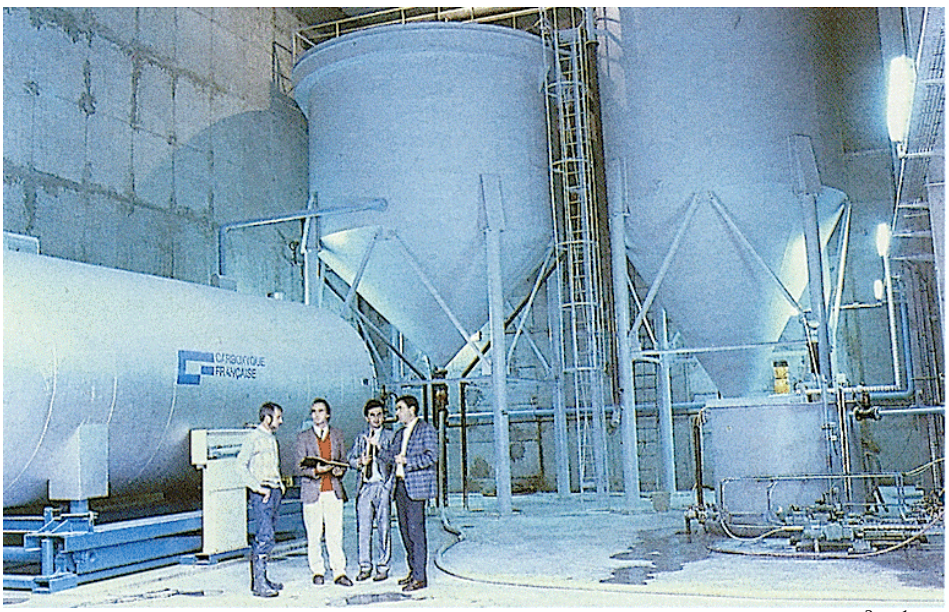


Figure 127. Station de traitement du DORLAY (Loire). Débit 625 $m^3.h^{-1}$. Poste de reminéralisation par injection de CO^2 et chaux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

13.3.2.2. CO_2 et filtration sur produits neutralisants

Dans ce cas, la consommation de gaz carbonique est réduite (4,4 $g.m^{-3}$ 3 par degré de reminéralisation) et l'exploitation plus aisée; par contre, ce procédé ne permet pas le dépassement du pH d'équilibre si nécessaire, contrairement au procédé CO_2 et chaux.

13.3.2.3. Bicarbonate de sodium et sel de calcium

On introduit dans l'eau, simultanément, des ions bicarbonates HCO_3^-

(sous forme de bicarbonate de sodium) et des ions calcium Ca^{2+} (généralement sous forme de chlorure de calcium, parfois de sulfate de calcium).

Pour enrichir 1 m^3 d'eau de 1 °F, il faut employer 16,8 g de bicarbonate de sodium et

- soit 11,1 g de chlorure de calcium (en $CaCl_2$)
- soit 13,6 g de sulfate de calcium (en $CaS0_4$).

Pour ce dernier, on peut utiliser de la pierre à plâtre crue que l'on met en contact avec de l'eau afin de préparer une solution saturée contenant 2,3 g de $CaSO_4$, 2 H_2O ou 1,8 g de $CaSO_4$ par litre.

Le chlorure de calcium présente l'avantage d'être plus facile à mettre en oeuvre du fait de sa solubilité, mais par contre, il introduit dans l'eau des ions Cl^- qui, s'ils s'ajoutent à une teneur préexistante déjà notable, peuvent contrarier les effets du traitement de reminéralisation par leur influence sur les phénomènes de corrosion.

A moins d'atteindre un degré de reminéralisation très élevé, ce type de traitement

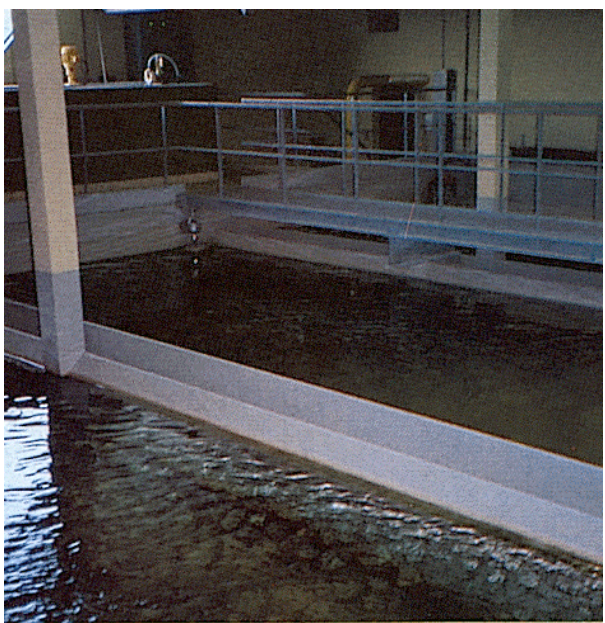


Figure 128. Station de traitement d ÉPINAL (Vosges). Débit 300 $m^3.h^{-1}$. Traitement de minéralisation par injection de CO_2 et filtration sur neutralité. 3 filtres de 28,5 m^2.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

doit être généralement complété par l'injection d'un réactif alcalin pour atteindre le pH d'équilibre. Ces traitements dont le coût d'investissement est faible (bacs de préparation et pompes doseuses) conduisent, par contre, à un coût d'exploitation élevé; ils sont mis en oeuvre en général sur des installations de petite ou moyenne importance.

13.3.2.4. Divers

Selon la qualité de l'eau et les produits disponibles sur place, on peut parfois faire appel aux procédés suivants

- bicarbonate de sodium + chaux ou carbonate de sodium,
- carbonate de sodium et gaz carbonique, - acide sulfurique et carbonate de calcium.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

14. ÉCHANGE GAZ LIQUIDE

Parmi les procédés de traitement de l'eau, nombreux sont ceux faisant intervenir un transfert de matière entre deux. phases, liquide et gazeuse.

Ces transferts de masse consistent à faire passer un constituant (appelé soluté d'une phase dans l'autre. Ils peuvent être classés en deux catégories

- **l'absorption,** transfert de constituants de la phase gazeuse à la phase liquide. I1 s'agit, soit de dissoudre un gaz (air, oxygène, ozone, chlore) dans l'eau pour traiter celle-ci: épuration biologique, déferrisation, désinfection; soit de dissoudre un gaz polluant (H_2S, SO_2 et produits soufrés, NOx, NH_3 et produits organiques volatils, HCl...) dans une solution liquide afin d'épurer la phase gazeuse lavage de gaz.

Cette absorption est fréquemment associée à une réaction chimique.

- **la désorption,** opération inverse consistant à faire passer en phase gazeuse les gaz volatils (CO_2, O_2, H_2S, NH_3, solvants chlorés) dissous dans l'eau: strippage et dégazage.

Cette désorption a lieu en l'absence. de réaction chimique.

Dans tous les cas, le système liquide/ gaz suit les lois de transfert de masse d'une phase à l'autre pour atteindre à la limite un état d'équilibre.

14.1. HASES THÉORIQUES DE L'ÉCHANGE GAZ/LIQUIDE

Les lois principales régissant l'échange gaz/liquide sont:

- dans la phase liquide, la loi de HENRY qui relie, pour une température donnée, la pression partielle d'un gaz p à sa fraction molaire x en phase liquide

p = Hx, H étant la constante de HENRY On trouve au chapitre 8, page 509 la constante de HENRY des gaz principaux.

- dans la phase gazeuse: la loi de DALTON et la loi des gaz parfaits.

Ainsi, pour un mélange gazeux occupant un volume V à la température T sous une pression P et constitué de m_1,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

m_2 ...m_n quantités massiques de gaz de masses molaires respectives M_1, M_2 M_n exerçant des pressions partielles P_1, P_2 P_n, on peut écrire

$$P = p_1 + p_2 + p_3 ... + p_n$$

$$\frac{p_1 M_1}{m_1} = \frac{p_2 M_2}{m_2} = ... \frac{p_n M_n}{m_n}$$

- Pour le transfert: **la théorie de Whitman et Lewis** qui permet de quantifier le flux global N de gaz transféré à travers la surface d'échange S en l'absence d'accumulation à l'interface

$N = k_L.S. (C_{il} - C_l) = k_g.S. (C_g - C_{ig})$

(cf. figure 129).

C_l et C_g sont les concentrations du gaz dans les phases liquide et gazeuse, seules accessibles à la mesure.

c_{il}, et C_{ig}. sont les concentrations à l'interface, k_L et k_g étant des coefficients de transfert dans les phases liquide et gazeuse dépendant de l'interface et de l'état &turbulence.

Ces lois mettent en valeur les paramètres essentiels d'un transfert efficace

- maintien d'un fort gradient de concentration entre phase liquide et gazeuse et interface. Ce gradient agit à la façon d'une force motrice ("driving force"),

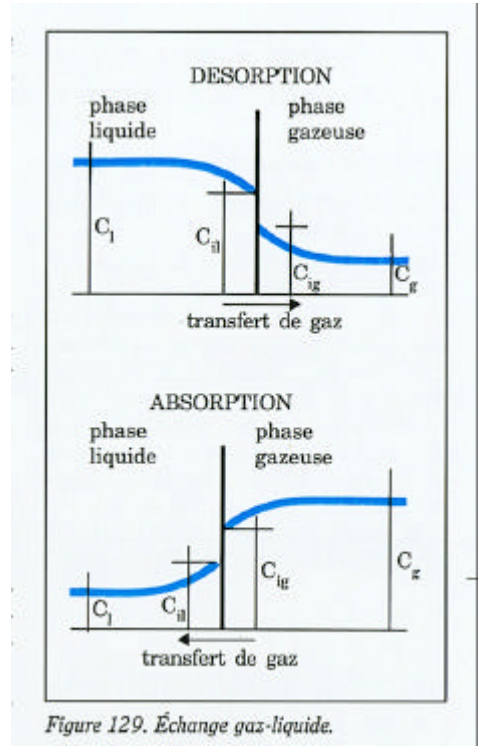


Figure 129. Échange gaz-liquide.

- création d'une interface gaz/liquide aussi importante que possible,
- utilisation d'un fort état de turbulence et d'agitation.

14.2 DISSOLUTION DE GAZ (ABSORPTION)

Cette opération est mise en oeuvre pour traiter une eau (déferrisation, désinfection, épuration biologique) ou pour épurer un gaz pollué. Les gaz à dissoudre sont généralement peu solubles et la résistance au transfert provient du film liquide de sorte que l'on peut écrire

$$N = \frac{dm}{dt} = k_L.S\ (C_s - C_l)$$

avec

m : masse de gaz transféré,

C_s: concentration de saturation du gaz dans le liquide,

C_l: concentration du gaz dans le liquide. Si V est le volume du liquide on a

$$\frac{dm}{dt} = V.\frac{dC}{dt}$$

$$\text{d'où } \frac{dC}{dt} = k_L \frac{S}{V} (C_l - C_s)$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans la pratique, ce facteur $k_L \frac{S}{V}$ est appelé K_L **a coefficient de transfert de masse.**

$a = \frac{S}{V}$ étant la surface spécifique d'échange. Si Cs et CI sont exprimés en $mg.l^{-1}$, K_L a est exprimé en s^{-1}.

Généralement l'absorption s'accompage, en traitement d'eau, d'une réaction chimique qui est souvent une réaction d'oxydation plus ou moins rapide (ex.: oxydation Fe^{2+}, désinfection, oxydation de matière organique avec ou sans respiration bactérienne, etc.). Dans le cas où le gaz réagit fortement avec certains constituants présents dans l'eau, le coefficient de transfert de masse est supérieur à celui dans l'eau pure. Non seulement la solubilité et la diffusivité du gaz sont à prendre en compte, mais également la cinétique chimique.

Deux principaux types de dissolution sont à distinguer

-entièrement au sein du liquide; ce qui nécessite un grand volume de gaz comprimé et dispersé par **bullage.** Les principales applications sont l'oxydation et la désinfection à l'ozone et l'oxygénation des boues activées (épuration biologique),

- entièrement à la surface du liquide, par multiplication des interfaces au moyen de colonnes à **Masse de contact ou à Garnissage** fonctionnant généralement au voisinage de la pression atmosphérique

laveurs de gaz.

Des solutions mixtes combinant ces deux modes de dissolution existent aussi : par exemple, colonnes de déferrisation, réacteurs NITRAZUR N, BIOFOR.

14.3. STRIPPAGE (DÉSORPTION)

Il s'agit d'extraire les gaz dissous dans l'eau pour les faire passer en phase gazeuse afin d'obtenir une eau dégazée à très faible concentration en gaz dissous. Ces gaz extraits de la phase liquide sont entraînés par un important contre-courant de gaz, appelé gaz d'entraînement. Le processus de dégazage n'est possible que si la teneur en gaz à éliminer dans le gaz d'entraînement est pratiquement nulle. L'application des lois de transfert montre que pour obtenir un niveau très bas en gaz dissous, on doit

- abaisser la fraction molaire du gaz considéré dans la phase gazeuse: strippage du CO_2, à l'air,
- abaisser la pression totale de la phase gazeuse: dégazage sous vide de l'oxygène et du CO_2
- augmenter la constante de HENRY dégazage thermique à température élevée (O_2, CO_2)

La plupart des gaz dissous précédemment mentionnés sont très peu solubles dans l'eau et c'est le transfert en phase liquide qui régit la désorption. Pour les gaz très solubles, (NH_3), la désorption est contrôlée par la phase gazeuse. Les appareils industriels le plus fréquemment employés sont des colonnes à garnissage dont le calcul se rapproche des colonnes de distillation.

La hauteur H de garnissage nécessaire au strippage peut être calculée

- soit par le produit H = HUT x NUT (dans le cas des gaz très peu solubles),

HUT : hauteur d'unité de transfert qui dépend essentiellement des caractéristiques du garnissage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

NUT : nombre d'unités de transfert qui dépend uniquement des concentrations initiales, finales, et à l'interface des différents étages,

- soit par le produit H = HEPT x NET (dans le cas de gaz très solubles),

NET: nombre d'étages théoriques déterminé par un calcul analytique ou graphique,

HEPT : hauteur équivalente à un plateau théorique, surtout fonction du garnissage.

Pour l'élimination de l'oxygène le nombre d'unités de transfert (ou d'étages) varie sur des eaux saturées, à 15 °C, de 8 à 12 pour des concentrations finales de 50 à 10 $\mu g.l^{-1}$.

La désorption de CO_2 est moins poussée. Sur un poste de déminéralisation, la réduction de la teneur en CO_2 de 70 à 10 $mg.l^{-1}$ nécessite moins de deux étages.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

15. EXTRACTION LIQUIDE/LIQUIDE

L'extraction liquide/liquide est l'opération fondamentale qui permet d'extraire un composant (soluté) d'un liquide, inerte, par un aute liquide (solvant)

Inerte + soluté: phase liquide 1 ↘	Extraction	↗ Soluté + solvant
Solvant: phase liquide 2 ↗	Liquide-liquide	↘ Inerte + traces soluté

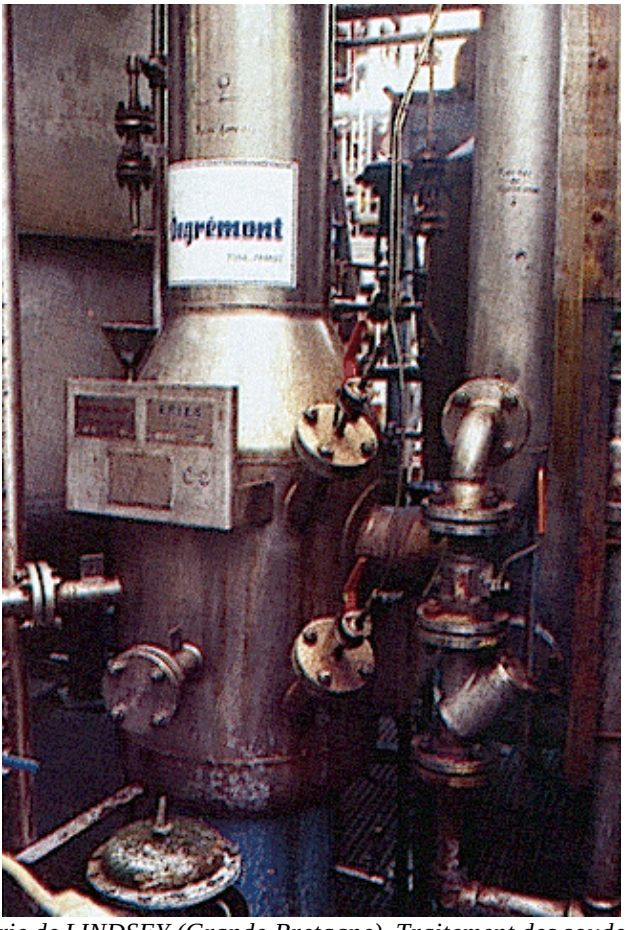


Figure 130. Raffinerie de LINDSEY (Grande-Bretagne). Traitement des soudes usées par steppage et extraction par solvant.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La phase liquide 1 est un mélange homogène. Le solvant doit ne pas être miscible avec l'un des deux composés initiaux: généralement, l'inerte et le solvant ne sont pas miscibles.

L'extraction liquide/liquide est également gouvernée par les lois de transfert de masse avec recherche des paramètres favorisant l'échange: aire interfaciale maximale, grande différence de concentration, coefficient de transfert (ou d'extraction) important.

On distingue deux grands types d'appareils industriels utilisant les procédés d'extraction liquide/liquide

- les contacteurs à plusieurs étages individualisés disposés en série. A chaque étage, les fonctions dispersion puis séparation des deux phases sont réalisées dans deux appareils successifs: mélangeur-décanteur et hydrocyclone-décanteur,
- les contacteurs différentiels: une phase est dispersée à contre-courant, dans l'autre, les phases sont ensuite séparées aux deux extrémités de la colonne verticale (cf. figure 131).

Le mode de dispersion des deux phases peut être gravitaire par agitation mécanique, pulsation...

L'extraction liquide/liquide est utilisée dans le déphénolage des soudes usées de raffinerie avec le gazole comme solvant. Le rendement d'élimination des phénols est élevé (90-95 %) en utilisant des colonnes pulsées à plateaux perforés.

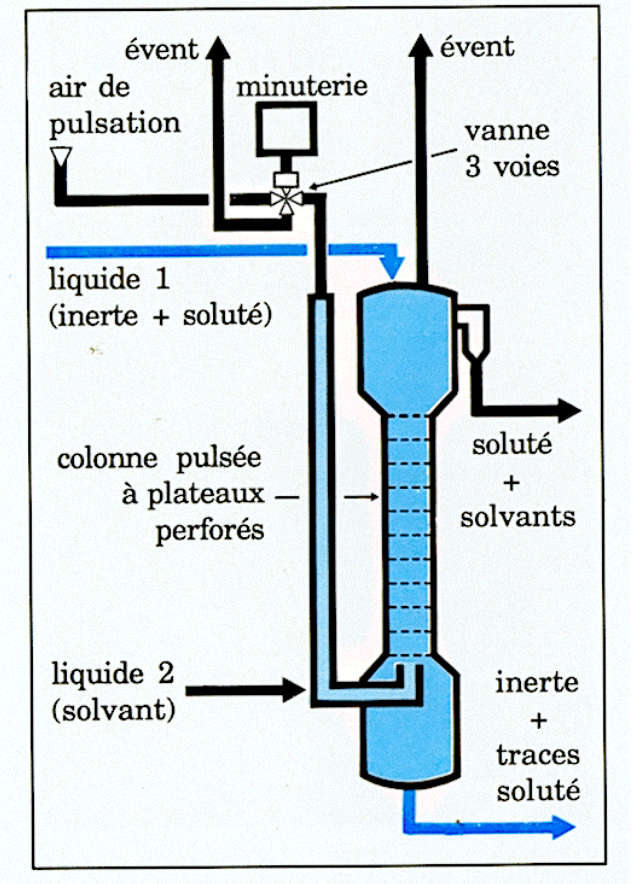


Figure 131. Schéma de colonne pulsée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4
PROCESSUS ÉLÉMENTAIRES DU GÉNIE BIOLOGIQUE DU TRAITEMENT DE L'EAU

1. GÉNÉRALITÉS

Le traitement biologique des eaux fait appel à différents types de **fermentation**. Une fermentation se définit comme étant une dégradation de certaines substances organiques, souvent accompagnée de dégagements gazeux sous l'action d'enzymes secrétés par les micro-organismes.

1.1. ÉVOLUTION D'UNE CULTURE BACTÉRIENNE

Après ensemencement, une culture bactérienne se développe jusqu'à épuisement du milieu nutritif si l'environnement est favorable. La figure 132 établie dans des conditions de température, pH, etc., constantes, représente la variation de **X la concentration de la culture** bactérienne, en fonction du temps t, en masse par unité de volume. Plusieurs phases se succèdent:

- **Phase de latence**

Au cours de cette phase d'adaptation, la cellule synthétise en particulier les enzymes nécessaires à la métabolisation du substrat Cette phase est importante lorsque l'eau n'est pas préalablement ensemencée par des germes adaptés: cela peut être le cas de certains rejets industriels. Durant cette phase, il n'y a pas de reproduction cellulaire.

$$X = C_{te} = X_o$$

X_o étant la concentration cellulaire au temps t = 0:

La vitesse de croissance est donc nulle

$$\frac{dX}{dt} = 0.$$

- **Phase exponentielle de croissance**

Cette phase est obtenue quand le taux de reproduction cellulaire atteint son maximum et reste constant en présence d'une concentration non limitante en substrat. Elle est évaluée par le **temps de**

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

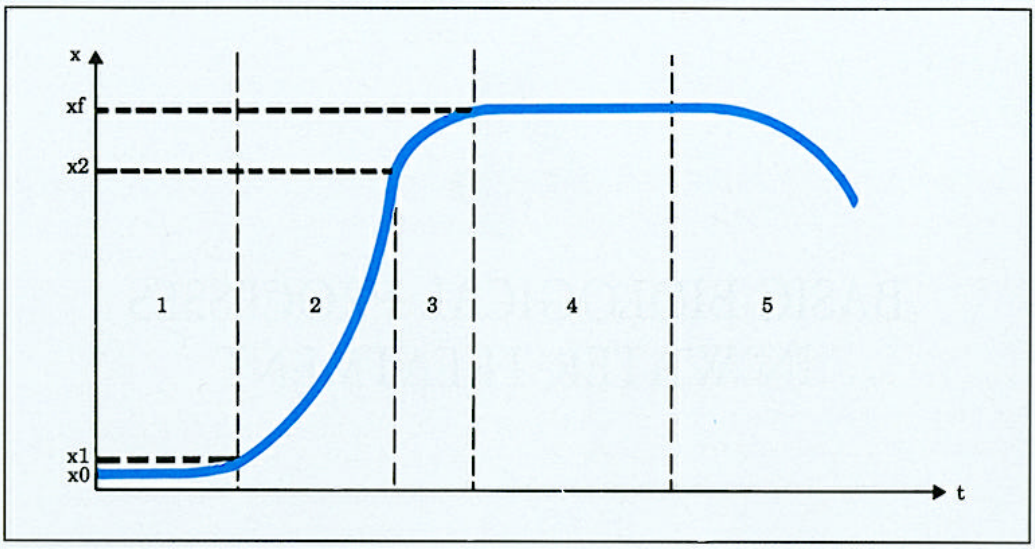


Figure 132. Développement d'une culture bactérienne

génération, tg (ou de doublement) de la population bactérienne, qui prend alors sa valeur minimale. Au cours de cette phase, la vitesse de croissance, dX/dt, augmente proportionnellement à X (d'où l'allure exponentielle de la courbe). En coordonnées semi-logarithmiques, la courbe a l'allure d'une droite. On a l'équation suivante

$$\frac{dX}{dt}\cdot\frac{1}{X}=\mu_m$$

avec ìm taux de croissance maximal. ou encore:

$$\mathrm{Log}\frac{X_2}{X_1}=\mu_m\,(t_2-t_1)$$

t_g est donné pour $X_2 = 2X_1$:

$$t_g=\frac{\mathrm{Log}2}{\mu_m}=\frac{0{,}693}{\mu_m}$$

- **Phase de ralentissement**

Elle correspond à l'épuisement du milieu de culture avec disparition de un ou plusieurs éléments nécessaires à la croissance bactérienne. Dans certains cas, la phase de ralentissement peut être due à l'accumulation de produits inhibiteurs provenant du métabolisme bactérien. X continue à augmenter, mais dX/dt diminue.

- **Phase stationnaire**

X atteint sa valeur maximale X_{max} La croissance s'arrête, même si les cellules conservent une certaine activité métabolique.

- **Phase de décroissance (ou encore phase endogène)**

La concentration en cellules vivantes diminue du fait de la mortalité dont le taux va augmenter. Cette mortalité est due à l'autolyse enzymatique des cellules.

Ces différentes phases eues équations qui les régissent, sont valables en milieu aérobie ou anaérobie. Les valeurs des différents coefficients dépendent, bien entendu, de la nature des micro-organismes, du substrat et de divers paramètres (température, pH).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2. MODÉLISATION DE LA CROISSANCE BACTÉRIENNE

Dans la plupart des applications industrielles, compte tenu des rendements de dépollution demandés qui conduisent à des concentrations finales en substrat faibles, la biomasse sera en phase de croissance ralentie. Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour rendre compte de la partie de la courbe correspondant à la phase de ralentissement et au-delà, mais la plupart des modèles mis au point tentent de couvrir la totalité de la courbe de croissance.

Le **modèle de MONOD** est le plus ancien, c'est également le plus connu, et encore le plus utilisé. C'est un modèle empirique, très proche de la loi de MICHAELIS-MENTEN relative aux réactions enzymatiques. Il s'écrit

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad \text{avec} : \mu = \mu_m . \left(\frac{S}{K + S}\right)$$

S étant la concentration de la solution en substrat limiteur de croissance.

K a la signification d'une concentration seuil au-dessous de laquelle le taux de croissance devient très dépendant de la concentrationen substrat. Cette constante correspond à la valeur de S pour laquelle

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{2}$$

K est généralement très petit et pendant toute la phase de croissance exponentielle, $\mu = \mu_{max}$.

Il est important de souligner que dans le cas de cultures bactériennes faisant intervenir différentes souches de micro-organismes, le μ mesuré est en fait un μ résultant A un instant donné, certaines bactéries pourront se trouver à une phase de croissance différente de celle d'autres.

Pour des études très spécialisées, (cultures pures, valorisation d'un métabolite), d'autres modèles sont utilisés.

1.3. L'ACTIVITÉ D'UNE BIOMASSE

Dans tout procédé de fermentation, la masse de micro-organismes présents est un paramètre important, mais il en est un autre: leur niveau d'activité. On cherche à optimiser le produit masse de micro-organismes x activité spécifique.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour mesurer l'activité d'une biomasse.

La mesure de l'ATP (adénosine triphosphate) est pratiquement abandonnée par les traiteurs d'eaux car les résultats sont difficilement interprétables. Celle de l'activité déshydrogénasique est handicapée par la dispersion des résultats et celle de l'ADN (acide désoxyribonucléique) conduit à une méthode de dosage longue et fastidieuse. Les méthodes respirométriques sont de nouveau les plus utilisées (voir page 366).

1.4. L'ÉLIMINATION DU SUBSTRAT

Avec une masse donnée de micro-organismes, la vitesse de disparition d'un substrat S en fonction du temps peut prendre plusieurs allures. On utilise fréquemment la notion d'ordre de réaction. Une réaction est dite d'ordre zéro si

$$\frac{dS}{dt} = \text{constante},$$

ce qui signifie que la vitesse de réaction est indépendante de la concentation en substrat. Dans le cas contraire, on a une relation de type

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

$\frac{dS}{dt} = K.S^n$:

la réaction est dite d'ordre n.

En traitement d'eau, l'évolution de S en fonction du temps, pour une masse donnée et constante de micro-organismes, prend souvent l'allure de la courbe de la figure 133.

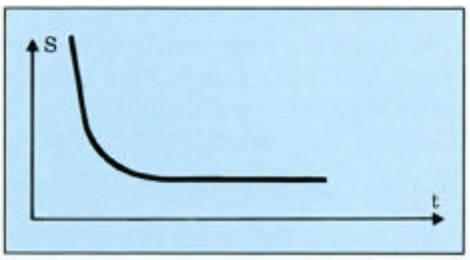


Figure 133. Elimination du substrat.

On observe dans un premier temps une réaction d'ordre zéro. Puis quand la concentration en substrat devient inférieure à une certaine valeur, il y a changement d'ordre de la réaction, donc un ralentissement de la vitesse de disparition du substrat Cela signifie que les dernières fractions de substrat sont souvent difficiles à éliminer.

La première phase correspond à des phénomènes complexes de biosorption et de floculation des matières colloïdales; puis la disparition du substrat est liée à son utilisation par les micro-organismes.

1.5. CULTURES AÉROBIES, CULTURES ANAÉROBIES

Les traitements biologiques utilisés en traitement d'eau ne font que reprendre des phénomènes naturels. Deux voies sont possibles pour dépolluer les effluents

- la **voie aérobie** si l'oxygène est associé aux réactions. Cette voie est celle qui s'instaure spontanément dans les eaux suffisamment aérées. Le carbone organique se retrouve sous forme de CO_2 et de biomasse,
- la **voie anaérobie,** si les réactions s'effectuent à l'abri de l'air, en milieu réducteur. Le carbone organique, après dégradation, se retrouve sous forme de CO_2, CH4 et biomasse. Le faible potentiel d'oxydo-réduction fait passer l'azote sous forme NH_3, le soufre sous forme H_2S ou de différents types de composés soufrés organiques, tels que les mercaptans.

D'une façon générale, il est possible de schématiser la dégradation du glucose selon ces deux voies

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow[\text{en aérobiose}]{} 6\,CO_2 + 6\,H_2O +$$

2,72 $kJ.mol^{-1}$ (650 $cal.mol^{-1}$).

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow[\text{en anaérobiose}]{} 3\,CO_2 + 3\,CH_4$$

+ 0,144 $kJ.mol^{-1}$ (34,4 $cal.\ mol^{-1}$).

La synthèse de un gramme de biomasse, demandant le même apport énergétique, quelle que soit la voie choisie, le taux de génération des germes aérobies est plus élevé que celui des germes anaérobies et le processus de dégradation de la matière carbonée est plus rapide. Par contre la production de boues est plus faible en anaérobiose.

On réserve généralement le terme **anoxie** à un environnement pratiquement exempt d'oxygène dissous, sans que, pour autant des fermentations acide et anaérobie se développent

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.6. TOXICITÉ, INHIBITION

Le bon déroulement d'une fermentation aérobie ou anaérobie, demande des conditions de milieu assez strictes. Parmi ces conditions, la température et le pH ont un rôle important. Mais il est également nécessaire que le milieu ne contienne pas de produits toxiques ou inhibiteurs susceptibles de ralentir, voire de stopper de façon irréversible l'activité bactérienne.

La plupart des métaux lourds se comportent comme des toxiques vis-à-vis de la flore bactérienne. C'est le cas plus particulièrement du cuivre, du chrome, du nickel, du zinc, du mercure et du plomb. Ces métaux agissent, soit en se fixant sur certains sites enzymatiques, qu'ils bloquent, soit en dénaturant certains enzymes, soit enfin en modifiant la perméabilité de la membrane cellulaire.

Des anions comme les cyanures, les fluorures, les arséniates, les chromates et bichromates ont un comportement analogue. Les halogènes et certains composés organiques, peuvent intervenir également en dénaturant les protéines ou d'autres composants de la cellule.

Les bactéries n'ont pas la même sensibilité aux différents toxiques. Leur sensibilité à tel ou tel produit dépend également de leur état physiologique. Certaines souches sont même capables de dégrader des toxiques comme les cyanures ou les phénols.

Dans la pratique, il est souvent possible d'adapter une culture bactérienne à la présence de toxiques ou d'inhibiteurs, et de reculer ainsi les seuils de toxicité. Certains métaux peuvent se fixer sur le floc bactérien sous forme de complexes organométalliques insolubles, sans qu'ils perturbent la croissance bactérienne. A noter cependant que la présence de ces métaux dans les boues en excès peut les 287 rendre impropres à une réutilisation agricole, si les teneurs dépassent certaines limites.

Au-delà d'un certain seuil, certains métabolites peuvent être eux-mêmes inhibiteurs de l'activité bactérienne.

1.7. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES BIORÉACTEURS

1.7.1. Cultures libres, cultures fixées

La mise en oeuvre des cultures bactériennes peut revêtir de très nombreuses formes. Il est classique de distinguer les procédés dits à cultures libres et les procédés dits à cultures fixées.

- Dans les procédés à **cultures libres, utilisés** uniquement en traitement d'eaux résiduaires, on provoque le développement d'une culture bactérienne dispersée sous forme de flocs, au sein du liquide à traiter. On utilise pour cela un bassin brassé pour conserver en suspension la culture, et dans lequel on maintient

- soit, une certaine concentration en oxygène: ce sont les procédés aérobies tels que les boues activées, le lagunage aéré ou naturel,
- soit, au contraire, l'absence d'oxygène ce sont les procédés anaérobies tels que les procédés contact-clarification, à lit de boue, le lagunage anaérobie.

- Dans les techniques à **cultures fixées,.** on utilise la capacité qu'ont la plupart des

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

micro-organismes à produire des exopolymères permettant leur fixation sur des supports très divers, pour former un **biofilm.** Les cultures fixées, comme les cultures libres, peuvent s'utiliser en traitements aérobies ou anaérobies (biofiltres à milieu granulaire fin, lits bactériens, disques biologiques...).

Les cultures libres ont comme avantage essentiel, une relative simplicité de mise en oeuvre. Elles sont limitées cependant par les concentrations en micro-organismes admissibles dans les bassins et conduisent ainsi à des volumes d'ouvrages importants.

Par contre, les cultures fixées permettent d'obtenir dans les réacteurs des concentrations en biomasse (et parfois des activités) plus importantes, ce qui 288 permet de réduire leur taille.

Il est à noter qu'aussi bien en cultures libres qu'en cultures fixées, il y a production d'une biomasse en excès, qu'il est nécessaire d'extraire, de traiter et d'évacuer.

1.7.2. Dispersion et temps de séjour hydraulique

Une autre distinction importante, surtout dans le cas des procédés à cultures libres comme les boues activées, est celle entre bioréacteur de type homogène ou encore à mélange intégral et bioréacteur de type hétérogène de type flux piston par exemple. Un bioréacteur sera dit en mélange intégral, si en tous ses points, les concentrations (biomasse, substrat, oxygène...) et les températures sont identiques. Les bioréacteurs de type flux piston correspondent à des canaux présentant un rapport longueur/largeur élevé: dans ce cas des gradients de concentrations axiaux apparaissent. Dans un réacteur à flux piston idéal, le débit.

toutes les particules entrant à un instant donné dans le réacteur se trouvent ensuite à chaque instant dans des conditions hydrauliques identiques (vitesse et direction). Le temps de séjour hydraulique y est théoriquement le mémé pour toutes les particules alors que dans un réacteur à mélange intégral, la distribution des temps de séjour des particules est du type gaussien.

Ces caractéristiques hydrauliques sont importantes, car elles peuvent avoir des conséquences sur les cinétiques réactionnelles et même privilégier lé développement de certaines espèces bactériennes par rapport à d'autres.

- **Cinétiques réactionnelles**

Des considérations théoriques montrent que dès qu'une réaction est d'ordre supérieur à zéro, le flux piston doit permettre, pour un volume d'ouvrage donné, d'obtenir un état d'avancement des réactions supérieur au mélange intégral ou, pour un mémé état d'avancement d'une réaction, un volume d'ouvrage plus réduit.

- **Coefficient de dispersion**

Il n'existe pas à l'échelle industrielle de bioréacteurs fonctionnant en mélange intégral, ou en flux piston parfaits. Par contre, certains réacteurs seront proches, soit d'un mélange intégral, soit d'un flux piston. Afin de quantifier cette tendance, il est d'usage d'utiliser un coefficient de dispersion longitudinale. Une valeur zéro correspond à un flux piston parfait, tandis qu'une valeur infinie correspond à un mélange intégral parfait.

- **Temps de séjour hydraulique**

Si on appelle :

T_t le temps de séjour théorique, donné par

$t_t = \frac{V}{Q}$ avec V le volume du réacteur et Q le débit.

T_r le temps de séjour réel moyen pondéré.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

On peut établir la courbe de réponse après l'injection instantanée d'un produit traceur.

Plusieurs cas peuvent se présenter :

- $t_r < t_t$ (figure 134).

Cela est l'indice de **volumes morts** dans lesquels il y a stagnation d'eau, participant peu, voire pas du tout, aux différentes réactions. Cela se traduit généralement sur la courbe par une trainée. $-t_r=t_t$

Dans ce cas, tout le volume géométrique est parcouru par l'eau.

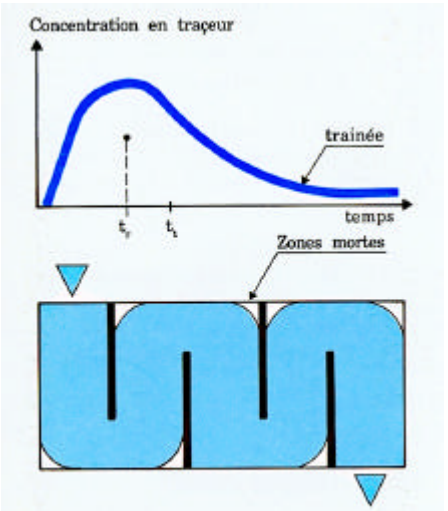


Figure 134. Courbe de traçage d'un réacteur avec volumes morts.

- $t_r > t_t$ (figure 135).

Ceci est l'indice d'un **court-circuit** à l'intérieur du réacteur (si tr est le temps de séjour moyen de l'eau ayant réellement traversé le réacteur).

L'utilisation en traitement d'eau de bioréacteurs fonctionnant dans les conditions de plus en plus intensives oblige à bien prendre en considération toutes ces notions d'hydraulique

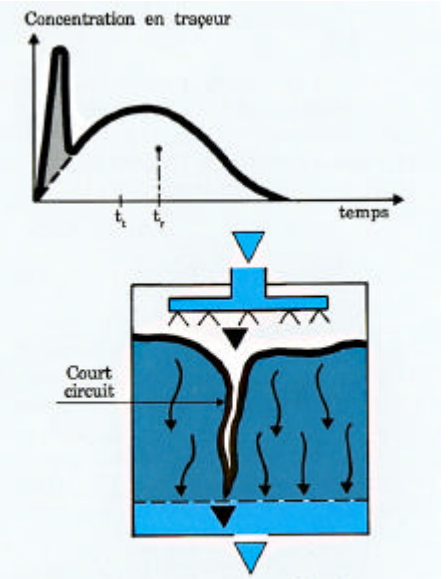


Figure 135. Courbe de traçage d'un réacteur avec court-circuit.

1.8. CARACTÉRISTIQUES DU SUBSTRAT

Est appelé substrat l'ensemble des produits contenus dans une eau et susceptibles d'être utilisés par les bactéries pour leur croissance. Ces éléments peuvent être classés de la façon suivante

- éléments majeurs: C, H, 0 et N,
- éléments mineurs: P, K, S et Mg,
- vitamines et hormones,
- éléments traces ou oligo éléments (Co, Fe, Ni, etc.).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans le milieu particulièrement complexe que représente la plupart des eaux résiduaires, les éléments traces, les vitamines et les hormones sont généralement en concentration suffisante pour assurer une épuration correcte. Il en est de même pour K, S et Mg. Par contre, il peut arriver que l'eau à traiter ne contienne pas assez de phosphore, ni même d'azote; il faut alors en rajouter. La lutte contre l'entrophisation peut nécessiter, elle, l'élimination de ces éléments (voir page 30).

Pour qu'un effluent puisse être traité par voie biologique, il doit présenter des caractéristiques compatibles avec la croissance bactérienne: pH, température, absence de produits inhibiteurs ou toxiques.

1.8.1. Pollution carbonée
(voir page 16)

Le carbone organique est généralement la pollution principale à éliminer. Il constitue, en outre l'essentiel de la biomasse (formule très simplifiée: $C_5H_7NO_2$). Compte tenu de la diversité des formes de pollutions carbonées, on a la plupart du temps recours à des méthodes de caractérisation globale.

La figure 136 représente l'évolution de la DBO en fonction du temps d'oxydation. Pour être complète, celle-ci demande un temps de 21 jours environ à 20 °C. On obtient alors la DBO ultime ou DBO 21.

Si dans une eau toutes les matières organiques étaient biodégradables, on devrait avoir

$$DCO = DB0_{21}$$

C'est le cas du glucose pour lequel on a

$$\frac{DBO_{21}}{DBO_5} = \frac{DCO}{DBO_5} = 1{,}46$$

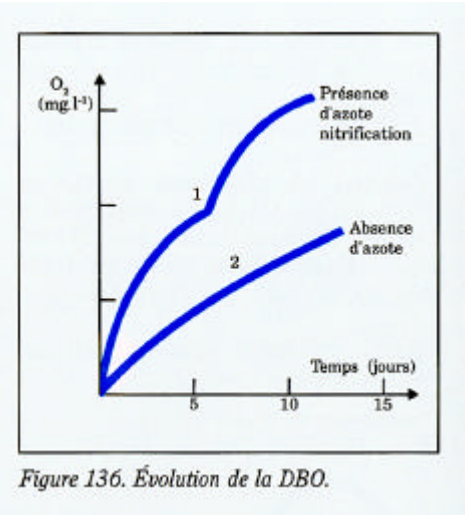


Figure 136. Évolution de la DBO.

S'il y a des matières organiques non biodégradables, (cas des eaux ménagères et de nombreux rejets industriels) on a

$$DCO > DB0_{21}$$

Comme exemple type de corps organiques non biodégradables, on peut citer la cellulose, la lignine, les tanins, la sciure de bois, etc.

Au cours d'un traitement biologique, le rapport $\frac{DCO}{DBO_5}$ de l'effluent augmente sensiblement.

1.8.2. Pollution azotée

Les sources d'azote susceptibles d'être utilisées par les différents micro-organismes incluent pratiquement toutes les sources d'azote organique et minéral. L'azote est métabolisé pour fournir essentiellement des protéines, des acides nucléiques et les polymères des parois cellulaires. On peut estimer que l'azote constitute environ 12 % du poids sec d'une biomasse pure. En traitement d'eau résiduaire, cette valeur est généralement ramenée à moins de 10 %.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

On distingue dans une eau usée les différentes formes suivantes de l'azote

- **Formes réduites** correspondant à l'azote Kjeldahl: N-organique, $N\text{-}NH_4^+$ (azote ammoniacal).
- **Formes oxydées:** $N\text{-}NO_2^-$ (azote nitreux), $N\text{-}NO_3^-$ (azote nitrique).

Le terme "Azote global", fréquemment utilisé dans le traitement des eaux résiduaires, correspond à la somme des formes réduites et oxydées.

1.8.3. Pollution phosphorée

Le phosphore est incorporé essentiellement dans les acides nucléiques, les phospholipides et les polymères des parois bactériennes. Dans certains cas particuliers, il peut être stocké dans la cellule, sous forme de polymétaphosphate (déphosphatation biologique, voir page 303). Une très faible fraction de phosphore est sous forme de phosphore organique diffusible, tel que l'ATP (Adénosine triphosphate).

Le phosphore représente 1,5 à 2 % du poids sec d'une biomasse. Il est à noter cependant que ce pourcentage augmente avec le taux de croissance et varie inversement avec la température.

Le phosphore peut être présent dans les eaux usées, soit sous forme d'orthophosphates, soit sous forme de polyphosphates ou de phosphore organique. On parle aussi de phosphore total qui correspond à la somme de toutes les formes de phosphore.

1.9. LA POLLUTION ET LE MILIEU RÉCEPTEUR INTÉRÊT DE LA MODÉLISATION

Il est possible de déterminer les conséquences d'un rejet polluant sur le milieu récepteur par des mesures directes sur site, mais cela n'est généralement réalisé que pour un nombre très limité de régimes hydrauliques.

D'autre part, pour prévoir l'influence de déversements futurs ou accidentels ou pour établir une réduction programmée des rejets polluants, il n'est pas possible de se passer de modèles mathématiques. Les modèles actuellement utilisés portent essentiellement sur

- la réoxygénation du milieu aquatique (depuis l'atmosphère et par photosynthèse des plantes aquatiques et des algues),
- l'oxydation de la matière organique ainsi que des formes réduites de l'azote.

Ces modèles ont pour but de déterminer l'évolution des teneurs en oxygène dissous ainsi qu'en $DB0_5$ (ou COT), $N\text{-}NH_4^+$, etc., en aval du point de rejet.

Les formulations proposées sont très empiriques. Les constantes de réaération en rivière dépendent en particulier de la vitesse et de la profondeur du cours d'eau. La modélisation des formes réduites de l'azote reste délicate en raison des incertitudes sur la détermination des flux polluants (en particulier ceux d'origine agricole) ainsi que de la complexité des phénomènes de nitrification. La prise en compte de l'évolution des dépôts en rivière et de ses conséquences se heurte à de grosses difficultés.

C'est probablement dans le domaine de l'eutrophisation des lacs que la modélisation a été la plus performante.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.10. PERSPECTIVES DU GÉNIE BIOLOGIQUE

Les biotechnologies progressent par l'émergence de techniques nouvelles issues du génie **génétique, enzymatique ou immunologique.** Leurs applications dans le métier du traiteur d'eau sont prometteuses même si certaines techniques restent futuristes ou semblent utopiques du fait de la complexité des substrats à traiter.

Une des voies intéressantes est d'utiliser la spécificité des enzymes soit pour accélérer la dégradation de substances particulières présentes en grande quantité, soit pour développer des capteurs ou
sondes biologiques. Ces systèmes, basés sur la fixation d'enzymes ou de micro-organismes sur une membrane, doivent permettre de quantifier rapidement et sélectivement des polluants ou micropolluants (pesticides, etc.). D'autres techniques pourront faire appel aux mécanismes de reconnaissance immunitaire, pour la détection des micro-organismes, même à concentration très faible (pour le traitement d'EP).

Il est tentant également d'utiliser le génie biologique pour générer des micro-organismes capables d'assurer la dépollution des effluents avec des cinétiques très supérieures à la normale ou pour dégrader des substrats inattaqués jusque là par les méthodes conventionnelles.

Mais la production et l'utilisation au stade industriel de ces bactéries "mutantes" ne sont pas sans poser des problèmes difficiles

- compétition par rapport aux micro-organismes naturels,
- comportement face à la multiplicité des substances à dégrader,
- fuite de ces micro-organismes dans le milieu naturel.

Par contre, isoler et produire des micro-organismes issus du milieu naturel, de façon à en assurer un apport massif dans des environnements qui en sont dépourvus, peut permettre d'accélérer un processus de sélection et d'épuration qui s'établirait trop lentement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. CULTURES BACTÉRIENNES AÉROBIES

Les installations d'épuration par voie aérobie ont longtemps été dimensionnées de façon empirique, en utilisant des "nombres d'or": 150 à 200 litres de bassin d'aération par équivalent habitant ou 100 litres de lit bactérien par équivalent habitant, etc.

Une approche plus rationnelle de la conception et du dimensionnement de telles stations est maintenant possible grâce

- d'une part, aux retombées des études microbiologiques qui, en expliquant de nombreux phénomènes, ont conduit à la mise au point de traitements originaux pour éliminer non seulement la pollution carbonée, mais également les pollutions azotée et phosphorée,
- et d'autre part, au développement du génie fermentaire qui permet de déterminer avec plus de précision les principaux éléments d'une station: circuits hydrauliques, volume d'ouvrages, besoins en oxygène, production de boues, etc

.

2.1. CULTURES LIBRES (BOUES ACTIVÉES)

2.1.1. Définition

Les procédés par boues activées comportent essentiellement une phase de mise en contact de l'eau à épurer avec un floc bactérien en présence d'oxygène **(aération)** suivie par une phase de séparation de ce floc **(clarification).** Ils sont en fait une intensification de ce qui se passe dans le milieu naturel. La différence provient d'une plus grande concentration en micro-organismes et, par conséquent, d'une demande volumique en oxygène plus importante. De plus, pour maintenir en suspension la masse bactérienne, une agitation artificielle est nécessaire.

La date de naissance du procédé est probablement le vendredi 3 avril 1914, quand deux chercheurs anglais, Edward Ardern et William Lockett présentent à la Société de Chimie Industrielle de Londres un compte rendu de leurs travaux intitulés "Expériences sur l'oxydation des eaux d'égout sans intervention de filtres".

Jusqu'à la fin de la deuxième guerre mondiale, le dimension-nement des stations d'épuration reste très prudent. Ce n'est qu'après que se développent les systèmes à forte charge avec l'utilisation de bassins combinés (AEROACCELAT0R, OXYCONTACT, OXYRAPID), les procédés "Biosorption ou Contact stabilisation" etc.

Actuellement, la recherche de rendements d'épuration plus élevés liée à la fréquente nécessité d'éliminer l'azote, ainsi que l'exploitation relativement délicate des systèmes à forte charge, renouvellent l'intérêt des traitements à faible charge.

Une station de traitement par boues activées comprend dans tous les cas (figure 137)

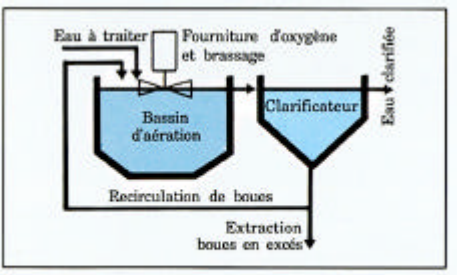


Figure 137. Schéma simplifié d'un système à boues activées.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- un bassin dit d'aération dans lequel l'eau à épurer est mise en contact avec la masse bactérienne épuratrice,
- un clarificateur dans lequel s'effectue la séparation de l'eau épurée et de la culture bactérienne,
- un dispositif de recirculation assurant le retour vers le bassin d'aération des boues biologiques récupérées dans le clarificateur. Cela permet de maintenir dans ce bassin la quantité (ou concentration) de micro-organismes nécessaire pour assurer le niveau d'épuration recherché,
-un dispositif d'extraction et d'évacuation des boues en excès, c'est-à-dire du surplus de culture bactérienne synthétisée en permanence à partir du substrat,
- un dispositif de fourniture d'oxygène à la masse bactérienne présente dans le bassin d'aération,
- un dispositif de brassage de ce même bassin, afin d'assurer au mieux le contact entre les cellules bactériennes et la nourriture, d'éviter les dépôts, de favoriser la diffusion de l'oxygène partout où il en est besoin. Très fréquemment, le même dispositif est utilisé pour l'aération et le brassage.

La suspension boueuse contenant la flore bactérienne épuratrice contenue dans le bassin d'aération s'appelle :**boues activées.**

Le mode d'alimentation d'une station d'épuration par boues activées est un paramètre important qui permet de distinguer différents procédés (voir page 691).

2.1.2. Relations de base pour l'élimination de la pollution carbonée

Elles conduisent à l'utilisation de coefficients caractéristiques qui dépendent de la nature du substrat et de l'état physiologique de la biomasse (âge des boues: voir
page 296).

2.1.2.1. Besoins en oxygène et production de boues en excès

Lorsque la matière organique biodégradable est consommée par une masse de micro-organismes, en milieu aérobie, il y a
- d'une part, consommation d'oxygène par ces micro-organismes pour leurs besoins énergétiques, leur reproduction par division cellulaire (synthèse de la matière vivante) et leur respiration endogène (auto-oxydation de leur masse cellulaire),
- d'autre part, production d'un excédent de matière vivante et de matière inerte appelé **boues en excès.**

Il est difficile de connaître expérimentalement la concentration active X_a des boues activées; par contre, on peut mesurer la concentration en matières volatiles X_v et celle en MES totales (minérales et organiques) X_t.

Pour illustrer ces différents phénomènes, la dégradation d'une molécule totalement biodégradable: le glucose, peut être prise comme exemple. Le glucose est dans un premier stade transformé grâce à un apport complémentaire d'azote assimilable en protéine cellulaire, dont la formule globale sera assimilée à $C_5H_7NO_2$.
Dans un second stade, cette protéine est dégradée dans la cellule même pour fournir l'énergie d'entretien. On peut écrire schématiquement ces deux réactions

-Synthèse

$$6\,C_6H_{12}O_6 + 4\,NH_3 + 16\,O_2 \rightarrow 4\,C_5H_7NO_2 + 16\,CO_2 + 28\,H_2O$$

- Auto-oxydation ou **respiration endogène**

$$4\,C_5H_7NO_2 + 20\,O_2 \rightarrow 20\,CO_2 + 4\,NH_3 + 8\,H_2O$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Bien évidemment, sur une station d'épuration, il y a coexistence de ces deux réactions, la seconde n'étant jamais complète, car elle correspondrait à des temps de séjour des boues très élevés, conduisant à des volumes d'ouvrages beaucoup trop importants.

Si la seconde réaction n'est pas complètement réalisée, elle est plus ou moins déplacée vers la droite suivant les procédés utilisés. Plus elle est déplacée vers la droite, moins la production de boues en excès est élevée, mais plus la consommation d'oxygène est importante.

Dans l'exemple précédent, l'oxydation complète des 6 molécules de glucose a donc demandé 36 molécules d'oxygène. Ces 36 molécules correspondent à la DCO des 6 molécules de glucose, ou encore à la DBO ultime. Sur les 36 molécules d'oxygène, 16 ont été utilisées pour la synthèse et 20 pour la respiration endogène.

On appelle a'_u la fraction de la DBO utlime utilisée pour la synthèse

$$a'_u = \frac{16\ O_2}{36\ O_2} = 0{,}45$$

On appelle a„ la fraction de la DBO ultime utilisée pour l'oxydation complète de la matière vivante

$$a_u = \frac{20\ O_2}{36\ O_2} = 0{,}55$$

Le paramètre a_{mu} peut être, quant à lui, assimilé à un rendement cellulaire: c'est la masse de cellules formées par masse de DBO ultime éliminée. Dans le cas précédent:

$$a_{mu} = \frac{4\ C_5H_7NO_2}{36\ O_2} = 0{,}39$$

Donc pour dégrader 1 g de DBO ultime, on synthétise 0,39 g de matière vivante.

- **Application à la détermination des besoins en oxygène**

Les besoins en oxygène sont de deux natures

- besoins pour la synthèse bactérienne. Ils s'expriment sous la forme

a_u' X DBO ultime éliminée

- besoins pour la respiration endogène il a été vu que sur une station, la totalité de la masse de bactéries synthétisées n'est pas oxydée en CO_2 et H_2O. Seule une fraction b_u des 4 $C_5H_7NO_2$ synthétisés sera transformée en CO2 et H2O. Autrement dit, seule une fraction b_u' des 20 O_2 nécessaires à l'oxydation complète de la matière vivante est à fournir

$$b'_u = \frac{b_u}{4\ C_5H_7NO_2} \cdot 20\ O_2$$

Les besoins en oxygène pour la respiration endogène peuvent donc se mettre sous la forme

b'_u masse de matière vivante

Les besoins globaux seront donc égaux à a'_u.DBO ultime éliminée + b'_u.masse de matière vivante

Dans les calculs, ces besoins en oxygène sont exprimés en kg par jour.

Les valeurs habituellement utilisées sont par commodité

- **a'** relative à la DBO_5 et non la DBO ultime,
- **b'** relative à la masse de matière volatile (voire parfois de matière totale) et non à celle de matière vivante.

- **Application à la détermination de la production de biomasse** en excès

La production de boues biologiques en excès fait intervenir deux facteurs

- la production de biomasse lors des réactions de synthèse,
- la consommation d'une partie de cette biomasse lors des réactions de respiration endogène.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La biomasse produite lors de la synthèse s'exprime par: a_m.DBO_5 éliminée.

La respiration endogène quant à elle consomme: b.masse de MV.

Le bilan est donc

a_m.DBO_5 éliminée - b.masse de MV.

Cette production de boues est exprimée en kg de MES par jour. Il faut lui ajouter la quantité de matières en suspension non biodégradables contenues dans l'effluent brut.

Par commodité le coefficient am est exprimé par rapport à la $DB0_5$ (et non la DBO ultime) et le coefficient b l'est par rapport à la matière volatile (et non la matière vivante).

En épuration biologique d'ERU à moyenne charge (cf. ci-dessous) les
valeurs suivantes peuvent être adoptées pour une première estimation rapide

a' = 0,5 kg par kg de $DB0_5$
b' = 0,1 $kg.j^{-1}$ par kg de M.V.
am = 0,6 kg par kg de $DB0_5$
b = 0,05 $kg.j^{-1}$ par kg de M.V.

2.1.2.2. Paramètres de fonctionnement d'un réacteur biologique

En traitement d'eau, un réacteur biologique pourra se caractériser suivant trois paramètres essentiels: la charge (massique et volumique), l'aptitude des boues à la décantation et l'âge de ces boues.

- **Charge massique et volumique**

On appelle charge massique Cm (ou facteur de charge) le rapport entre la masse de nourriture (exprimée généralement en terme de DBO_5) entrant journellement dans le réacteur et la masse de boue contenue dans ce réacteur

$$C_m = \frac{Q.S_o}{X_t.V}$$

avec:

Q : le débit journalier,
So : la concentration en substrat,
Xt : la concentration en matières en suspension de la boue,
V : le volume du réacteur.

Il serait plus logique de prendre en compte les matières volatiles X_v plutôt que les matières en suspension (totales) X_t. On définirait ainsi une charge massique C'_m.

$$C'_m = \frac{X_t}{X_v} \cdot C_m$$

On se conformera cependant à l'usage le plus fréquent de la valeur C_m pour la charge massique.

Cette notion de charge massique est importante, car elle conditionne pour une boue activée

- son rendement épuratoire, les faibles charges massiques correspondant à des rendements épuratoires élevés, les fortes charges massiques, correspondant à des rendements plus faibles,
- la production de boues biologiques en excès : à faible charge la respiration endogène étant, de par la limitation en substrat, plus importante qu'à forte charge, la production de biomasse résultante est plus faible,
- le degré de stabilisation des boues en excès produites: une respiration endogène poussée conduisant à une biomasse bien minéralisée, les procédés à faible charge se caractérisent par des boues en excès moins fermentescibles,
- les besoins en oxygène ramenés à la pollution éliminée: l'importance de la respiration endogène à faible charge conduit à des consommations d'oxygène rapportées à la pollution éliminée, supérieures à celles obtenues en forte charge.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Il est possible de classer les différents procédés par boues activées suivant la valeur de la charge massique à laquelle ils fonctionnent.

Charge massique kg DBO_5/kg MES.j.	**Classe du procédé**
$C_m < 0,15$	Faible charge (ou aérationprolongée si $C_m < 0,07$)
$0,15 < C_m < 0,4$	Moyenne charge
$0,4 < C_m$	Forte charge

Il est fréquent d'utiliser une autre notion de charge: la charge volumique. On appelle charge volumique C_v, la masse de nourriture (exprimée habituellement en terme de DBO_5) entrant journellement par unité de volume de réacteur

$$C_v = \frac{Q\,S_0}{V}$$

exprimée le plus souvent en kg DBO_5/m^3.j.

- **Age des boues**

L'âge de boue A est le rapport entre la masse de boues présentes dans le réacteurs et la masse journalière de boues extraites de la station.

La production journalière de boues biologiques en excès a été donnée en page 294. Si on appelle X_v la concentration en matières volatiles dans le bassin d'aération et V le volume de ce dernier, il vient :

$$A = \frac{X_v.V}{a_m.DBO_5\ \text{éliminée} - b.X_v.V}$$

Si on appelle E le rendement d'élimination de la DBO_5, on obtient après simplification

$$A = \frac{1}{a_m.E.C'_m - b}$$

L'âge des boues est donc inversement proportionnel à la charge massique Cette notion d'âge de boues est particulièrement importante car elle traduit l'état physiologique des micro-organismes: les coefficients respiratoires a' et b', vus précédemment, lui sont étroitement corrélés (figure 138). En outre, l'âge de boues conditionne la présence ou l'absence de germes nitrificateurs (voir figure 139).

- **Décantabilité des boues**

Le bon fonctionnement d'une station de boues activées repose sur celui du bassin d'aération, mais également sur celui du clarificateur. Pour que ce dernier puisse séparer efficacement la biomasse de l'eau traitée, cette biomasse doit être correctement floculée.

Les micro-organismes présentent la propriété dans certaines conditions de s'agglomérer en flocs. On parle encore de **biofloculation**.

Durant la phase de croissance exponentielle, les bactéries restent dispersées dans le milieu de culture. Au moment du passage en phase ralentie, elles s'agglomèrent en flocons de couleur brunâtre d'aspect déchiqueté pouvant atteindre couramment quelques millimètres. Vus

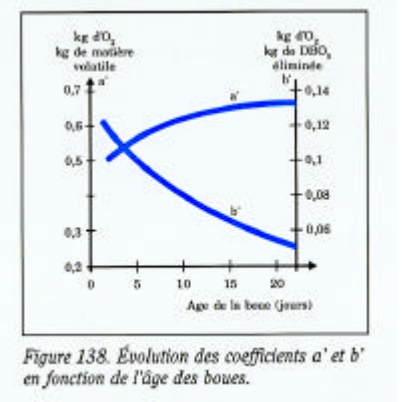


Figure 138. Évolution des coefficients a' et b' en fonction de l'âge des boues.

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

au microscope, ils ont fréquemment un aspect ramifié en "doigts de gant". Les bactéries y apparaissent englobées dans des substances d'aspect gélatineux. Le floc subsiste en phase de métabolisme endogène, mais si on suit l'évolution du pourcentage d'organismes libres, non associés au floc, en fonction de l'âge de la boue, on peut établir que le minimum se situe dans une fourchette comprise entre quatre et neuf jours. Au-delà de neuf jours, bien que la décantabilité reste bonne dans l'ensemble, on constate un début de défloculation qui se traduit par une diminution de la taille du floc et une augmentation du nombre de petites particules échappées à ce floc (floc en tête d'épingle).

Inversement, en dessous de quatre jours, le floc très hydrophile décante plus mal et le nombre de micro-organismes libres augmente très rapidement.

La biofloculation est un phénomène complexe. A l'heure actuelle, il est bien établi:

- qu'elle est contrôlée par l'état physiologique des cellules,
- qu'elle n'est pas le privilège d'une seule espèce, mais correspond à un comportement assez répandu dans la microflore banale,
- que l'effet essentiel est lié à l'excrétion de polymères parmi lesquels les polysaccharides jouent un rôle particulier.

Un moyen simple et pratique d'apprécier l'aptitude d'une boue à la décantation est de déterminer son **indice de MOHLMAN** (voir page 162).

- **Aération**

L'apport d'oxygène dans une eau se fait par contact intime entre l'air et l'eau. A l'interface des deux fluides, la couche limite monomoléculaire se sature en oxygène dès sa formation, en même temps que s'amorce la diffusion des gaz vers des couches d'eau plus profondes.

La quantité d'oxygène qui diffuse par unité de temps est

$$\frac{dm}{dt} = K_L a \frac{dC}{dt}$$

KL a est appelé **coefficient de transfert** (voir page 277).

Partant de cette équation, on définit la **capacité d'oxygénation** (CAP.OX.) d'un système d'aération comme étant la quantité d'oxygène exprimée en $g.m^{-3}$ fournie à l'eau pure en une heure, à une teneur d'oxygène constante et nulle, une température de 10 °C et une pression atmosphérique de 760 mm de mercure.

L'équation suivante permet de calculer la valeur de CAP.OX

$$\frac{dC}{dt} = 11{,}25 \frac{1}{t_1 - t_0} \log \frac{C_s - C_o}{C_s - C_t} \sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}$$

C_s : teneur en O_2 à la saturation en $g.m^{-3}$
C_o : teneur en O_2 au début de l'expérience, en $g.m^{-3}$
C_t : teneur en O_2 au bout du temps t
11,25 : saturation en O_2 à 10 °C, en $g.m^{-3}$
$t_1 - t_0$: durée d'observation en heure
$\frac{dC}{dt}$: CAP.OX. en $g/m^3.h$
k_{10} et k_t : coefficients de diffusion à 10 °C et t °C

Si on pose $C_s - C_o = D_o$ et $C_S - C_t = D_t$ déficits en O_2 à l'instant initial et à l'instant t, on a

$$CAP.OX. = 11{,}25 \cdot 2{,}3 \frac{1}{t_1 - t_0} \log \frac{D_o}{D_t} \sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}$$

La relation entre D_o et D_t, reportée sur coordonnées logarithmiques donne une droite en fonction du temps dont la pente tg a caractérise la vitesse de dissolution de l'oxygène

$$CAP.OX. = 25{,}9 \operatorname{tg} \alpha \sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'importance de l'apport d'oxygène peut être schématisé de la façon dépend:
- de la valeur des interfaces entre l'air et l'eau et du renouvellement de celles-ci,
- du gradient d'oxygène entre l'air et l'eau,
- du temps disponible pour la diffusion de l'oxygène.

Les valeurs optimales, pour ces conditions, sont toutefois soumises à des limites physico-techniques.

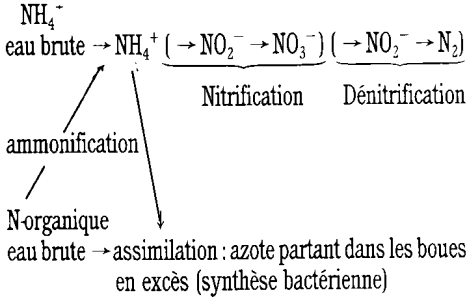
La dimension des bulles est importante, elle a cependant une limite inférieure car la bulle d'air qui s'échappe d'un orifice sous l'eau a un diamètre bien supérieur à celui des pores: pratiquement, les bulles formées à partir des systèmes d'aération par corps poreux ont un diamètre de l'ordre du millimètre. Des bulles plus fines ne peuvent être obtenues que par détente de l'eau saturée d'air sous pression (procédé utilisé pour la flottation).

Le coefficient de transfert de l'oxygène $K_L a$, toutes choses égales par ailleurs, est fonction de la nature de l'eau (eau propre, eau usée contenant des matières en suspension ou dissoutes - présence de matières tensio-actives), du système d'aération employé et de la géométrie du réacteur.

En général, la comparaison des systèmes d'aération se fait d'après leur capactié d'oxygénation par m3 d'eau pure et par heure; on peut aussi exprimer **l'apport spécifique** d'un système par la quantité d'oxygène fournie par kWh.

2.1.3. Nitrification et dénitrification

Dans les ERU ainsi que dans de nombreuses ERI, l'azote est essentiellement présent sous forme organique et ammoniacale. Dans une station conçue pour éliminer l'azote, l'ensemble des réactions peut être schématisé de la façon suivante :



Dans le traitement d'EP, la phase d'assimilation est négligeable.

L'élimination biologique de l'azote fait donc intervenir quatre réactions principales.

2.1.3.1. L'ammonification

C'est la transformation de l'azote organique en azote ammociacal. La vitesse d'ammonification dépend essentiellement de la concentration en azote ammoniacal. On fait intervenir une constante d'inhibition de type Monod. Ainsi, si on appelle r_x la vitesse d'ammonification, on aura:

$$r_x = \frac{r_x\,(N - NH_4 = 0).K_n}{K_n + N^*}$$

avec:

N* la concentration en azote ammoniacal

K_n déterminé expérimentalement égal à 10 $mg.l^{-1}$

r_x ($N - NH_4 = 0$) =1,5 mg N par g de MV et par h.

Dans la grande majorité des cas, compte tenu de la nature de l'azote organique et des paramètres de fonctionnement des stations et plus particulièrement du temps de séjour de l'eau dans les ouvrages, la plus grande partie de l'azote organique sera ammonifiée sans problème.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.1.3.2. L'assimilation

C'est l'utilisation d'une partie de l'azote ammoniacal et éventuellement organique pour la synthèse bactérienne. L'assimilation peut jouer un rôle important pour l'élimination de l'azote dans certaines ERI. Mais dans bien des cas, et en particulier en ERU, l'assimilation ne suffit pas à elle seule à éliminer l'azote, car les quantités présentes dans les effluents à traiter sont bien supérieures à ce qui peut être assimilé pour la synthèse.

2.1.3.3. La nitrification

C'est l'oxydation de l'azote ammoniacal en nitrite puis en nitrate. Elle s'effectue en deux stades par des micro-organismes autotrophes

- oxydation de NH_4^+ en NO_2^-: c'est l'œuvre essentiellement des germes **Nitrosomonas,**
- oxydation de NO_2^- en NO_3^- : les bactéries responsables de cette deuxième réaction, appartiennent principalement au genre **Nitrobacter.**

La réaction globale simplifiée de la nitrification peut s'écrire

$$NH_4^+ + 2\,O_2 \rightarrow NO_3^- + 2\,H^+ + H_20$$

La nitrification n'est possible que si l'azote est présent au départ sous forme ammoniacale. La vitesse de transformation de l'ammonium en nitrate dans un procédé par boues activées est voisine de 3 mg de N - NH_4^+ oxydé en NO_3^- par g. de M.V. et par h. Il s'agit donc d'une valeur relativement élevée.

En fait, le temps de génération des bactéries de la nitrification est bien souvent le paramètre le plus contraignant pour le dimensionnement d'une installation devant nitrifier. Pour ces bactéries, les valeurs de μ_{max}, sont les suivantes

- Nitrobacter : $\mu_{max} = 0{,}03\ h^{-1}$
- Nitrosomonas : $\mu_{max} = 0{,}08\ h^{-1}$

Cette hiérarchie peut être inversée dans des conditions particulières (traitement de potabilisation d'eaux froides peu chargées en ammonium), mais généralement l'étape limitante est due aux bactéries responsables de l'oxydation de l'ammonium en nitrite.

Du fait que le taux de croissance des hétérotrophes, responsables de l'oxydation de la pollution carbonée, est plus élevé que celui des nitrificateurs autotrophes, l'âge de la boue dans le système épurateur choisi a un effet déterminant sur la nitrification. Dans des conditions de pH comprises entre 7,2 et 8, l'âge de boues minimal exprimé en jours pour démarrer une nitrification en boues activées, est lié à la température par la relation suivante

$$A_{minimal} = 6{,}5\ (0{,}914)^{T-20}$$

dans laquelle T est la température en °C. La figure 139 montre que cet âge de boues est très dépendant de la température et que la nitrification à des températures inférieures à 12 ou 13 °C, conduit à l'adoption de procédés à faible charge.

En-dessous de 8 °C le démarrage de la nitrification est extrêmement aléatoire mais par contre, si la flore nitrifiante a pu être préalablement développée et implantée à des températures normales, le procédé de nitrification peut se maintenir à des températures très inférieures avec des rendements d'oxydation de l'azote ammoniacal diminués.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La nitrification demande des besoins en oxygène supplémentaires. Il faut fournir 4,6 mg d'oxygène par mg de N(NO_3^-) produit (ou plus exactement 4, 2 mg en tenant compte de l'oxygène libéré par HCO_3). Les bactéries nitrifiantes sont cependant relativement tolérantes à des périodes de déficit en oxygène.

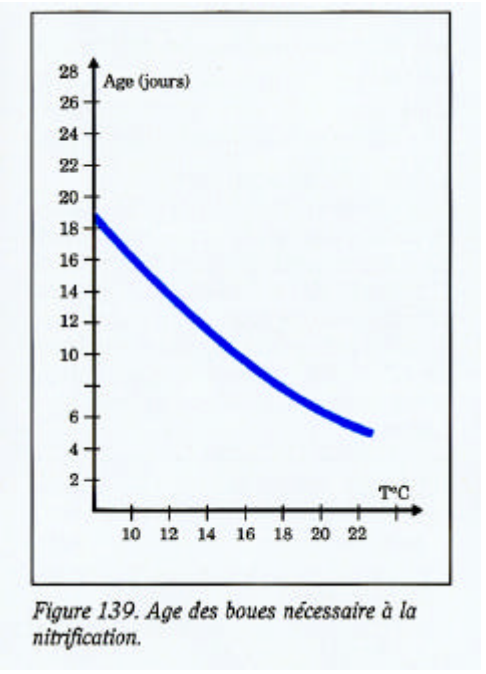


Figure 139. Age des boues nécessaire à la nitrification.

Un point important à souligner est celui de la destruction de l'alcalinité. Le taux de croissance des bactéries nitrifiantes détroit très sensiblement quand le pH devient inférieur à 7,2. La réaction de nitrification produisant des ion H+, l'alcalinité de l'effluent brut sera un facteur important à considérer. Le calcul et l'expérience montrent que 7,2 mg d'alcalinité exprimée en $CaCO_3$ (0,72 °F) sont nécessaires pour neutraliser les ions H^+ produits par l'oxydation de 1 mg de N- NH_4^+. Cela explique que dans certaines régions ayant des eaux douces, la nitrification entraîne, si aucune correction n'est apportée, une baisse de pH incompatible avec une oxydation complète de l'ammoniaque.

Enfin, les micro-organismes nitrificateurs sont sensibles à de nombreux facteurs de leur environnement. La présence de certains composés organiques ou minéraux peut modifier, voire même inhiber leur croissance. De telles difficultés peuvent apparaître sur certaines ERI.

2.1.3.4. La dénitrification

C'est le processus par lequel certaines bactéries réduisent l'azote nitrique à un état plus faible d'oxydation.

Ces bactéries peuvent être autotrophes, mais l'activité de celles-ci est faible. C'est la raison pour laquelle on met généralement en oeuvre des bactéries hétérotrophes.

Cette réduction se produit à travers différentes réactions que l'on peut schématiser comme suit

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$

Globalement, en épuration d'eaux résiduaires, on admet la réaction suivante

$$NO_3^- + 6H^+ + 5e^- \rightarrow 0{,}5N_2 + 3H_2O$$

Le donneur d'électrons sera de préférence du carbone organique ou, en l'absence de celui-ci, la masse bactérienne elle-même.

Quatre paramètres essentiels jouent sur la vitesse de dénitrification: la température, l'oxygène dissous, le pH et la source de carbone organique.

. **La température**

Son influence peut être exprimée par la relation suivante

$$r_T = r_{20°c}.?^{(T-20)}$$

dans laquelle r_X et $r_{20°C}$ sont les vitesses de dénitrification aux températures T_X et 20 °C exprimées en mg de N - NO_3^- réduit par mg de M.V. et par h.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

? , déterminé expérimentalement, est égal à 1,116 pour des températures comprises entre 5 et 27 °C (voir figure 140).

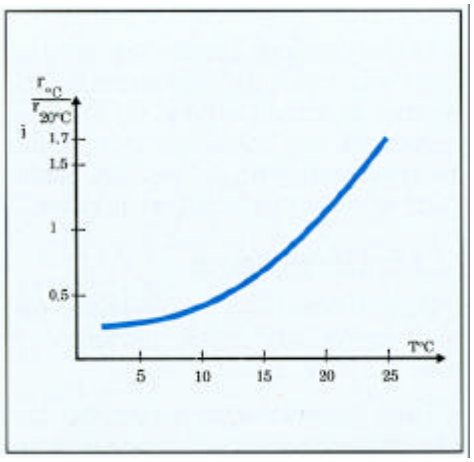


Figure 140. Influence de la température sur la vitesse de dénitrification.

- **Oxygène dissous**

La présence d'oxygène inhibe la dénitrification. En effet, les bactéries de la dénitrification tirent leur énergie de celle libérée lors du transfert des électrons des composés organiques vers O_2, NO_2^- ou NO_3^-. Si ces trois éléments sont disponibles comme accepteurs d'électrons, le choix de l'accepteur final est bien entendu celui qui donne la plus grande quantité d'énergie par unité de matière organique oxydée. Cette énergie étant plus grande dans le cas de l'oxygène que dans les autres, il en résulté que les électrons sont transférés en priorité sur l'oxygène.

Dans la réalité, il est difficile de donner des concentrations limites en O_2 au-delà desquelles la dénitrification est inhibée, car ces valeurs dépendent de la taille du floc et donc des possibilités de transfert plus ou moins facile de l'oxygène vers les bactéries. Elles dépendent également de la nature et de la concentration en carbone organique. Cependant des concentrations en O_2 supérieures à 0,5 $mg.l^{-1}$ sont déjà largement inhibitrices. Une autre approche consiste à mesurer non pas l'oxygène dissous, mais le potentiel d'oxydo-réduction. Bien que les chiffres rencontrés divergent fréquemment, on peut estimer que la dénitrification ne s'effectue dans des conditions acceptables que si le potentiel d'oxydo-réduction est inférieur à 220 mV.

- **pH**

Le pH optimal se situe entre 7 et 8,2.

- **Source de substrat carboné**

Le substrat carboné influe par sa nature et par sa concentration. Le tableau suivant donne pour quelques substrats les cinétiques de réduction des nitrates, exprimées en mg de N -NO_3- réduit par g de MV et par heure, pour une température de 20 °C. Ces valeurs de $r_{20°C}$ ont été obtenues avec des boues activées dénitrifiantes.

Ethanol	5,1
Acétate	4,9
Propionate	5,1
Méthanol	2,5
Butyrate	5,1
ERU	3,3
Respiration endogène	1,5

La dénitrification, par utilisation du carbone organique contenu dans un effluent urbain conduit donc à des cinétiques très acceptables comparées à celles obtenues avec des produits facilement biodégradables.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Cependant, dans certains cas, les quantités de carbone organique apportées par l'effluent peuvent être insuffisantes pour obtenir une dénitrification poussée. Enfin, il est à noter que l'utilisation du carbone organique, libéré par la respiration endogène conduit à des cinétiques de faible valeur. En pratique, cela se traduit par des volumes d'ouvrages importants, expliquant le peu de réalisations mettant en ceuvre cette technique.

2.1.4. La déphosphatation biologique

La possibilité d'effectuer une déphosphatation par voie biologique, c'est-à-dire sans apport de réactif et pratiquement sans production de boues en excès supplémentaires, a fait l'objet de nombreuses recherches. Ces recherches ont réellement démarré vers le milieu des années 60, avec les travaux de Shapiro et Levin. Ils observèrent que des boues activées non aérées, relarguaient du phosphore, puis que dès que la concentration en oxygène remontait, elles le réabsorbaient.

Le principe de la déphosphatation biologique consiste en une accumulation de phosphore dans une biomasse. Cette accumulation peut être due, soit à une précipitation chimique de phosphore inorganique au voisinage des bactéries dans des conditions particulières de micro-environnement, soit à une accumulation du phosphore par les micro-organismes eux-mêmes, soit à une combinaison des deux.

2.1.4.1. La précipitation extracellulaire du phosphore inorganique

Les principales causes possibles de la formation de ces précipités seraient une augmentation de pH ou une augmentation de la concentration d'ions précipitants.
Plusieurs observations confirment la possibilité de ces phénomènes. En effet, une culture bactérienne soumise à des conditions anaérobies voit diminuer sa concentration en calcium extracellulaire, alors qu'elle rejette du phosphore, du potassium et du magnésium (le potassium et le magnésium sont des ions stabilisateurs des polyphosphates intracellulaires). La libération d'ions phosphates semblerait donc provoquer une baisse de la concentration en calcium, d'où l'hypothèse d'une précipitation.

En l'absence d'oxygène, des variations de pH dues à la dénitrification et à la fermentation acide de produits organiques pourraient se superposer aux effets de l'augmentation de la concentration en phosphore et en accentuer ou diminuer les conséquences.

2.1.4.2. Accumulation intracellulaire de polyphosphates par les micro-organismes d'une boue activée

A côté de la précipitation extra-cellulaire très variable et difficilement quantifiable et maîtrisable, il est sûr aujourd'hui que le rôle essentiel est joué par des bactéries accumulatrices de polyphosphate (poly-P).

Le stockage de poly-P est un phénomène souvent observé en microbiologie, spécialement dans des cas de déséquilibre du milieu nutritif empêchant la synthèse d'acides nucléiques. Les polyphosphates accumulés peuvent servir, soit de réserve d'énergie comparable à la chaîne de phosphates dans le système ATP/ADP, soit de réserve en phosphore. Des analyses de résonance magnétique nucléaire (RMN) sur des boues déphosphatantes ont confirmé la présence de quantités importantes de poly-P. Celui-ci se trouve essentiellement sous forme de granules dits de "volutine".

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.1.4.3. Les phénomènes mis en jeu en déphosphatation biologique

La déphosphatation biologique demande une **alternance de séquences anaérobies/aérobies** : l'alternance de ces séquences a pour but de modifier l'équilibre enzymatique régulant la synthèse du poly-P en phase anaérobie.

- **Phase anaérobie**

Des bactéries acétogènes, anaérobies facultatives, utilisent le carbone organique mis à leur disposition (par exemple, le carbone organique de l'eau brute) pour produire de l'acétate. **Aéromonas** est le principal organisme responsable de cette acidogénèse anaérobie. A noter que la présence de nitrates dans cette phase anaérobie bloque la production d'acétate
cela s'explique par les capacités dénitrifiantes d'Aeromonas, qui ne se sert pas de son métabolisme fermentatif aussi longtemps qu'il y a des nitrates dans le milieu comme accepteur final d'électrons.

L'acétate produit est réutilisé par des bactéries du groupe **Acinetobacter/ Moraxella.** Ce sont des bactéries aérobies strictes qui ne peuvent utiliser qu'une gamme de substrats plutôt limitée. Elles consomment l'acétate, l'éthanol, le lactate, le citrate et quelques acides aminés, mais elles ne peuvent utiliser les sucres ou les acides gras volatils de masse molaire supérieure à celle de l'acide propionique.

L'acétate utilisé par **Acinetobacter/ Moraxella** est stocké in-situ sous forme de PHB (polyhydroxybutyrate). L'énergie nécessaire pour ce stockage provient de l'hydrolyse du poly-P, ce qui explique le relargage accéléré de phosphate dans le milieu. Dans ce processus, l'acidogénèse est l'étape limitante, ce qui explique pourquoi on ne trouve pas d'acétate libre dans les zones anaérobies.

- **Phase aérobie**

Les Acinetobacter/Moraxella trouvent des accepteurs d'électrons pour leur métabolisme (NO_3, oxygène): le PHB est alors utilisé comme substrat organique pour leur croissance et la reconstitution de leur réserve en poly-P par réabsorption du phosphore insterstitiel. Cette réabsorption va au-delà de ce qui avait été relargué en anaérobiose. Ainsi par succession de phases anaérobies-aérobies, on pourra obtenir une accumulation progressive du phosphore dans ces microorganismes, jusqu'à des valeurs pouvant atteindre 10 à 11 % de leur poids sec. Dans une boue activée déphosphatante, dans laquelle, bien entendu, existent d'autres bactéries, cette valeur pourra atteindre 7 % du poids sec.

Il est à noter qu'en phase aérobie, les autres organismes hétérotrophes, mais non accumulateurs de poly-P, ne disposent plus que d'une fraction de la matière organique qui, de plus, est la moins biodégradable.

Les différentes réactions sont résumées dans la figure 141.

Le point commun de tous les procédés utilisant la déphosphatation biologique est donc l'alternance d'une phase anaérobie dans laquelle la biomasse est mise en contact avec le carbone organique de l'eau brute et d'une phase aérobie dans laquelle le phosphore précédemment relargué est réassimilé.

Il est possible de classer ces procédés en deux grandes catégories
- ceux dans lesquels aucun réactif chimique n'est ajouté: dans ces systèmes, le phosphore est stocké "biologiquement" dans la boue et donc évacué avec ces boues en excès. Le rendement de déphos

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

phatation dépend donc intégralement de la teneur en phosphore de la boue ainsi que de la production de boues en excès,

- ceux dans lesquels il y a une déphosphatation combinée, biologique et physico-chimique. Le phosphore biologiquement accumulé dans la boue est relargué dans un faible volume d'eau: on obtient donc une concentration élevée en phosphore dans le liquide interstitiel et les réactifs chimiques sont ajoutés à ce niveau-là.

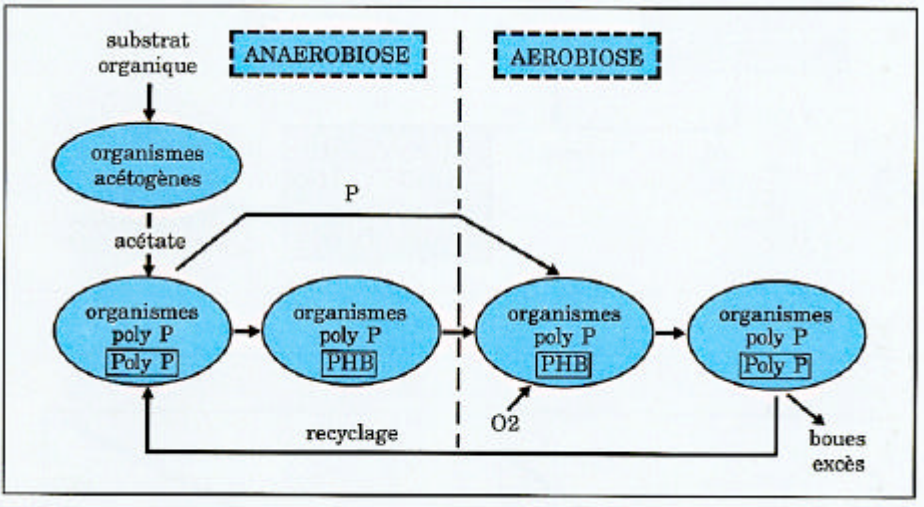


Figure 141. Les phénomènes mis en jeu en déphosphatation biologique.

2.1.5. Stabilisation aérobie

Ce procédé destiné à la réduction de la teneur en MO des boues est aussi désigné fréquemment sous le vocable de "digestion aérobie". Il consiste, par une aération prolongée des boues, à poursuivre le développement de micro-organismes aérobies au-delà de la période de synthèse des cellules et d'épuisement de substrat jusqu'à réaliser leur auto-oxydation. C'est le mécanisme de la respiration endogène aérobie (figure 142).

La matière cellulaire (représentée par $C_5H_7NO_2$) est transformée suivant la relation (voir page 294)

$C_5H_7NO_2 + 5\,O_2 \rightarrow 5\,CO_2 + NH_3 + 2\,H_2O$

L'ammonium peut ensuite être oxydé et on arrive alors à l'équation globale de

$C_5H_7NO_2 + 7O_2 \rightarrow 5\,CO_2 + NO_3^- + H^+ + 3\,H_2O$

Une chute de pH importante peut alors intervenir si l'alcalinité de l'eau usée est insuffisante.

La stabilisation aérobie s'applique le plus souvent sur des boues activées mais elle peut aussi s'appliquer sur des boues de simple décantation (primaire), ainsi que sur des biofilms provenant de réacteurs à cultures fixées. Les taux de réduction des MO (E %) obtenus varient ainsi très largement E % peut généralement se mettre sous la forme

E = p.log t + q, t étant le temps de stabilisation. La figure 143 a représente cette évolution dans le

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

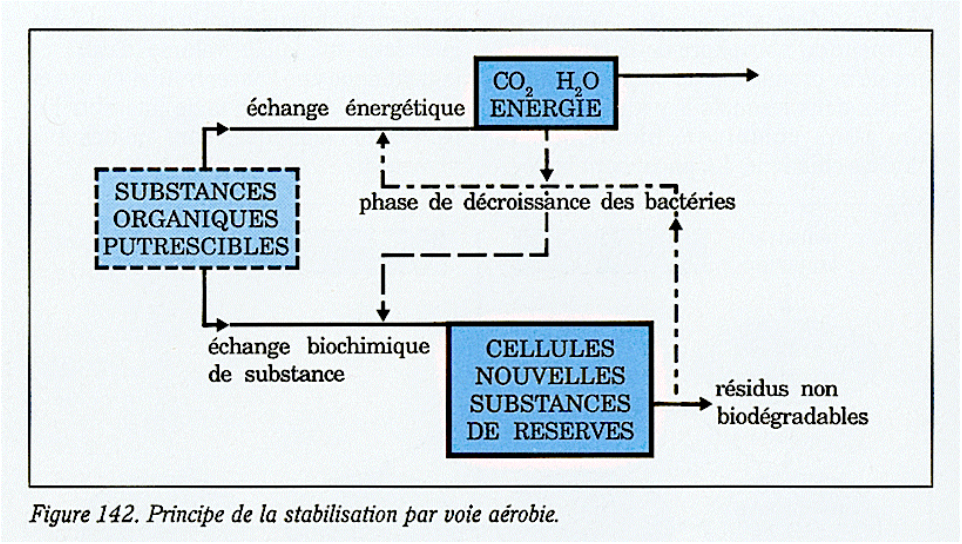


Figure 142. Principe de la stabilisation par voie aérobie.

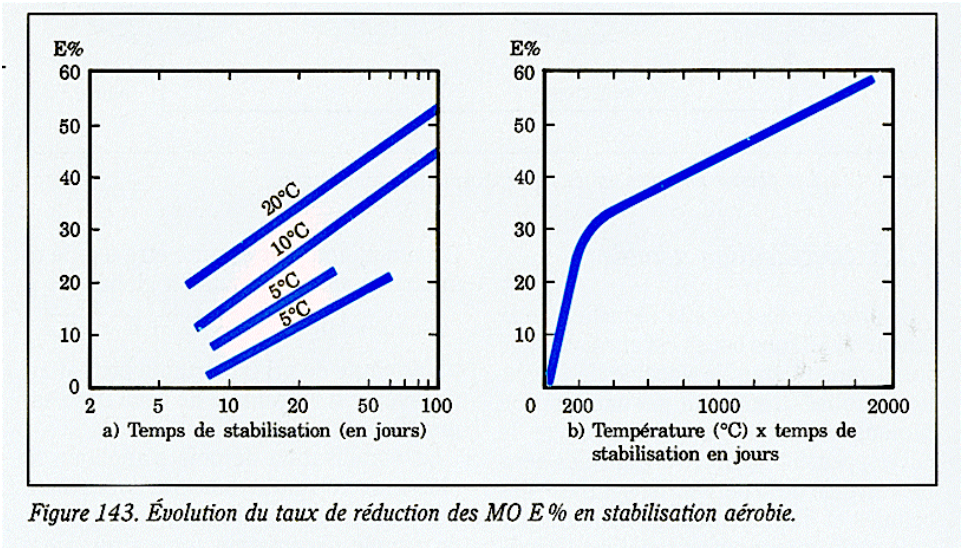


Figure 143. Évolution du taux de réduction des MO E % en stabilisation aérobie.

cas de boues activées présentant un âge de boues de 5 jours développées à partir d'un effluent urbain non décanté.

Les besoins en oxygène pour un temps de stabilisation de 15 jours à 15 °C varient de 0,1 à 0,15 kg d'O_2 par jour et par kg de MV suivant l'origine des boues. Ces consommations d'oxygène dépendent aussi de la température. KOERS et MAVINIC considèrent que le produit (température °C x temps de stabilisation) permet de prévoir le taux de réduction des matières organique (voir figure 143 b)établie sur le même type de boues

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Différents critères quantitatifs ont été proposés pour caractériser une boue suffisamment stabilisée
- niveau de respiration de la boue : 0,1 kg O_2 par kg de MO et par jour, à 20 °C,
- perte de poids inférieure à 10 après 120 h d'aération (dans un milieu présentant une teneur en O_2 de 2 mg.l^{-1}), à 20°C.

La quantification des acides volatils formés et de l'azote ammonifié par gramme de MO maintenue en anaérobiose est aussi une méthode de contrôle proposée.

Le terme de **digestion aérobie thermophile** est donné au procédé de stabilisation qui, par limitation des pertes calorifiques, permet de profiter du caractère exothermique de la réaction d'oxydation de la MO et de porter la température des boues au-delà de 50 °C.

2.2. CULTURES FIXÉES

2.2.1. Le film biologique

La plupart des micro-organismes sont capables de coloniser la surface d'un solide quand ils disposent de composés organiques, de sels minéraux et d'oxygène. La fixation se fait par l'intermédiaire d'une matière gélatineuse à base d'exopolymères produite par les bactéries et à l'intérieur de laquelle ces dernières ont une certaine mobilité. La colonisation initiale d'un solide s'effectue sur un certain nombre de sites privilégiés et à partir de ces sites, il y a développement continu du biofilm, jusqu'à ce que la surface totale du support soit couverte par une couche mono-cellulaire. A partir de ce moment-là, la croissance continue par production de nouvelles cellules qui viennent recouvrir la couche initiale.

L'oxygène et les nutriments véhiculés par l'eau à traiter, diffusent à travers l'épaisseur du biofilm, jusqu'à ce que cette épaisseur soit telle que les amas cellulaires les plus profonds ne soient plus

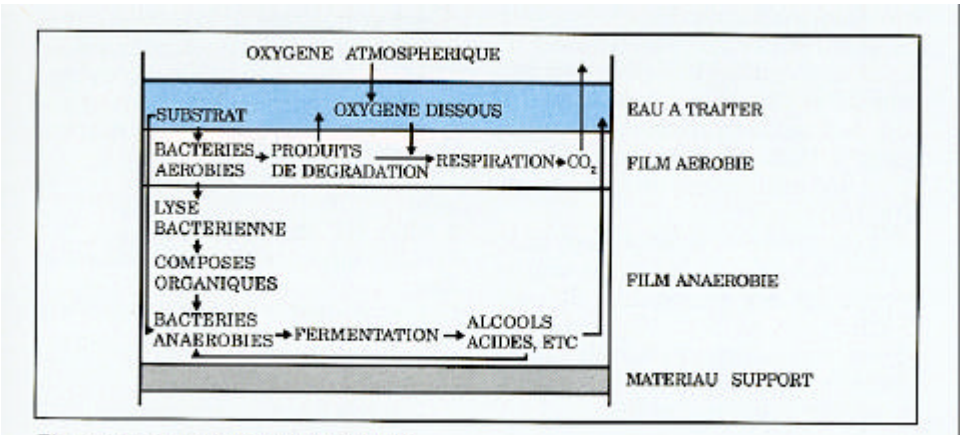


Figure 144. Coupe spécifique d'un biofilm.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

atteints par l'oxygène et les nutriments. Au bout d'un certain temps, il se produit ainsi une stratification avec superposition d'une couche aérobie dans laquelle l'oxygène diffuse et d'une couche anaérorie plus profonde dans laquelle l'oxygène est absent. L'importance de ces deux couches varies suivant le type de réacteur et de support (figure 144).

La mise en oeuvre de techniques à biofilm pour le traitement des eaux, montre que:

- le taux d'utilisation du substrat se stabilise à une valeur constante quand l'épaisseur du biofilm est telle que l'oxygène devient limitant dans les couches les plus profondes. L'épaisseur "active" peut être estimée à environ 300-400 pin,
- les bactéries fixées sur un support présentent généralement des activités spécifiques supérieures à celles observées en cultures libres.

2.2.2. Lits à ruissellement (lits bactériens)

Le principe de fonctionnement d'un lit bactérien, quelquefois appelé filtre bactérien ou filtre percolateur, par analogie au terme anglais "biofilter", consiste à faire ruisseler l'eau à traiter sur une masse de matériau, de surface spécifique comprise entre 50 et 200 $m^2.m^{-3}$, servant de support aux micro-organismes épurateurs qui y forment un film plus ou moins épais. Suivant la nature du matériau utilisé on distingue

- les lits bactériens à remplissage traditionnel. Dans ce cas, on utilise comme remplissage des pouzzolanes, du coke métallurgique ou des cailloux siliceux concassés présentant un taux de vide de l'ordre de 5 0 %. Ce type de lit bactérien a été surtout utilisé sur les ERU,
- les lits bactériens à remplissage plastique destinés souvent aux ERI. Ces matériaux plastiques mis en oeuvre en vrac ou ordonnés présentent des taux de vide supérieurs à 90%

Quand le substrat ne diffuse plus jusqu'à eux, les micro-organismes présents dans la couche anaérobie finissent par mourir puis par s'autolyser. Leur contenu cellulaire devient alors disponible pour d'autres micro-organismes aérobies facultatifs ou anaérobies. Quand toutes les réserves de substrat sont vraiment épuisées, la lyse des cellules restantes induit un détachement local du biofilm de la surface. Cette surface devient disponible pour une nouvelle colonisation. Le détachement du biofilm peut être créé ou favorisé par le courant d'eau passant à sa surface.

Quel que soit le matériau, tous les lits bactériens à ruissellement fonctionnent selon les mêmes principes.

Une aération est pratiquée, le plus souvent par tirage naturel, plus rarement par ventilation forcée à contre-courant.

2.2.2.1. Relations de base

La DBO éliminée sur un lit bactérien, dépend de la nature de l'eau à traiter, de la charge hydraulique, de la temp érature et de la nature du matériau de remplissage.

La formulation mathématique admet que dant un lit bactérien, les micro-organismes sont en phase de croissance ralentie

$$\frac{\bar{S}_f}{S_o} = \exp.\ (-\ k_1\ t)$$

avec:

S^f: DBO_5 de l'effluent clarifié,

S_o : DBO_5 soluble de l'eau d'alimentation du filtre,

t :temps de séjour moyen de l'eau dans le lit bactérien,

k_1 : constante dépendant:

- de la température de l'eau,
- du matériau de remplissage,
- de la nature de l'effluent à traiter.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 145. Photo de lit bactérien.

La valeur médiane de t est donnée par

$$t = k_2 \cdot \frac{H}{Q^n}$$

avec:
H : hauteur du lit,
Q : débit par unité de surface horizontale,
k_2 et n : constantes.
On a donc :

$$\frac{S_f}{S_o} = \exp.\ (-k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{H}{Q^n})$$

2.2.2.2. Lits bactériens à remplissage traditionnel

Avec des matériaux de remplissage traditionnel et pour une hauteur de couche de 2 m, le rendement d'épuration est relativement faible (66 %) lorsque la charge volumique (exprimée en kg de $DB0_5$ par m^3 de matériau et par jour) est forte. Dans ce cas, le rendement peut être augmenté par recirculation de l'effluent du lit bactérien, sur le lit, ce qui a pour effet de diluer l'eau d'alimentation.

Des équations empiriques ont été développées dans le cas d'effluents domestiques. Ainsi RANKIN, pour une charge hydraulique maximale, recirculation comprise, de 1,13 m^3/m^2.h propose les relations suivantes

- un seul étage de lit bactérien

$$S_f = \frac{S_o}{2\,r + 3}$$

- deux étages de lit bactérien

$$S_{f1} = 0{,}5\ S_o$$

$$S_{f2} = \frac{S_{f1}}{2\,r + 2}$$

avec: r : taux de recirculation.

Suivant la charge volumique appliquée, on distingue les lits à faible charge et les lits à forte charge, dont les caractéristiques de fonctionnement pour les eaux résiduaires urbaines sont les suivantes :

Charges	Faible	Forte
DBO kg/m^3.j	0,08 à 0,15	0,7 à 0,8
Charge hydraulique m^3/m^2 .h	< 0,4	> 0,7

Dans les lits à forte charge, qui nécessitent généralement une recir-culation, la charge hydraulique est telle qu'elle permet l'homogénéisation de la flore bactérienne aux différents niveaux. L'autocurage du matériau sur lequel ne subsiste qu'une mince pellicule active permet des échanges rapides et enlève au lit bactérien la tâche de dégrader lui-même la matière cellulaire formée. Ce travail de minéralisation (stabilisation) est réservé à d'autres parties de l'installation, comme par exemple le digesteur anaérobie, ce qui implique nécessairement l'emploi d'un clarificateur à la sortie du lit, pour recueillir les matières décantées afin de les envoyer vers le traitement de boues.

Dans un lit à forte charge, l'action des éléments prédateurs est faible. Dans un

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

lit à faible charge, au contraire, il n'y a pas de lavage permanent de la boue qui tend à s'accumuler au sein de la masse de contact. L'action des prédateurs est essentielle et c'est elle qui, avec la respiration endogène des bactéries, limite la prolifération excessive du film.

Si la charge appliquée en carbone organique est suffisamment faible, **la nitrification** est possible. La courbe de la figure 146 obtenue sur des ERU décantées à 15 °C (G. MARTIN), donne le rendement d'élimination de NTK en fonction de la charge volumique appliquée dans le cas d'un lit bactérien à remplissage pouzzolane.

Contrairement à ce que l'on observe dans une boue activée, la nitrification n'est pas un système "tout ou rien", cela provient de la stratification des microorganismes sur la hauteur. La partie supérieure contient surtout des hétérotrophes, la partie inférieure surtout des autotrophes. Contrairement aux boues activées, le paramètre limitant n'est plus l'âge de la boue, mais la cinétique de nitrification.

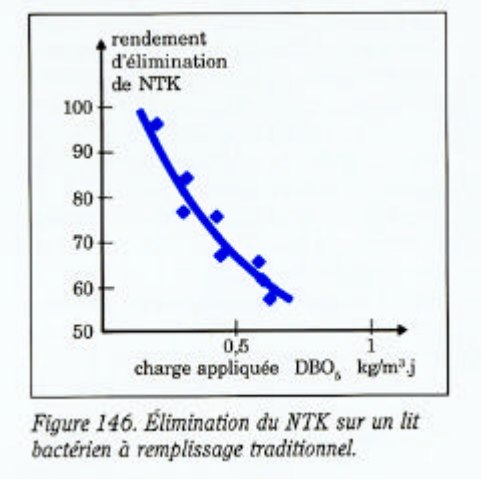


Figure 146. Élimination du NTK sur un lit bactérien à remplissage traditionnel.

Du fait de l'épaisseur de la zooglée fixée sur le support et de l'oxygénation souvent insuffisante, les lits bactériens permettent fréquemment une dénitrification partielle. Cette dénitrification est favorisée par le recyclage et elle s'effectue essentiellement dans les couches supérieures du lit bactérien, là où le carbone organique de l'eau brute est disponible.

Les boues d'un lit à faible charge sont bien minéralisées et sont parfois rejetées dans l'émissaire sans clarification finale, si l'on veut bien admettre des départs périodiques de boues avec l'effluent.

Du fait des risques fréquents de colmatage, des importants développements de mouches qu'ils facilitent et de leur coût, les lits à faible charge, sont peu employés malgré leur bon rendement (95 % sur la DBO_5 Les lits à forte charge, avec recirculation, sont plus fréquemment rencontrés pour l'élimination de la pollution carbonée.

- **Recirculation**

La recirculation a plusieurs avantages
- l'autocurage du lit bactérien,
- l'ensemencement des eaux décantées,
- la dilution des eaux résiduaires à forte DBO.

Elle peut se pratiquer de diverses façons (figure 147).

Le mode de recirculation n° 1 est le plus communément employé. Les boues secondaires sont recyclées en continu: le débit de recirculation étant prélevé au fond du clarificateur, celui-ci peut avoir une surface calculée uniquement pour une vitesse ascensionnelle correspondant au débit à traiter Q. Par contre, le décanteur primaire doit être calculé pour recevoir Q (1 + r), si r est le taux recyclage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les matériaux de remplissage utilisés doivent être propres et non friables. Leur granulométrie doit être régulière et comprise entre 40 et 80 mm. L'indice de vide est voisin de 0,5, ce qui, compte tenu de la présence du film biologique, limite à environ 0,15 le vide libre pour l'aération. Quel que soit le matériau traditionnel retenu, les risques de colmatage par les matières en suspension grossières des eaux brutes, imposent la construction d'un décanteur primaire en amont du lit.

2.2.2.3. Lits bactériens à remplissage plastique

Pour traiter des ERI présentant une forte DBO, telles que celles des industries agro-alimentaires, les lits bactériens à remplissage traditionnel sont peu employés en raison des risques de colmatage et de prolifération excessive de filins biologiques filamenteux.

Les remplissages plastiques permettent de réduire considérablement ces risques et présentent un coefficient de transfert d'oxygène plus élevé. Leur domaine d'utilisation est ainsi très différent de celui des lits bactériens à remplissage traditionnel, car:

- ils peuvent travailler sous des charges volumiques élevées, comprises entre 1 et 5 kg/m^3.j. de DBO_5, voire plus,
- le prix élevé de ces matériaux incite également à utiliser les lits bactériens plastiques sous forte charge. Dans ces conditions, le rendement d'élimination de la DBO_5 n'est pas suffisant pour produire un effluent conforme aux normes habituellement en vigueur, car il oscille entre 50 et 80 %, suivant le type d'eau traitée et de la charge volumique adoptée. Le lit bactérien à remplissage plastique sera donc fréquemment suivi par un traitement conventionnel, type boues activées.

Les remplissages en vrac semblent plus sensibles au colmatage que les matériaux ordonnés et leur emploi est généralement limité aux eaux à faible pollution et
dépourvues de matières en suspension, fibres ou graisses.

Une autre application peut en être dans les filtres nitrificateurs disposés à l'aval d'un étage d'épuration par boues activées. Le taux de nitrification est alors sur des ERU de l'ordre de 100 g de N-NH_4, par m^3 et par jour à 20 °C et de 50g à 15°C.

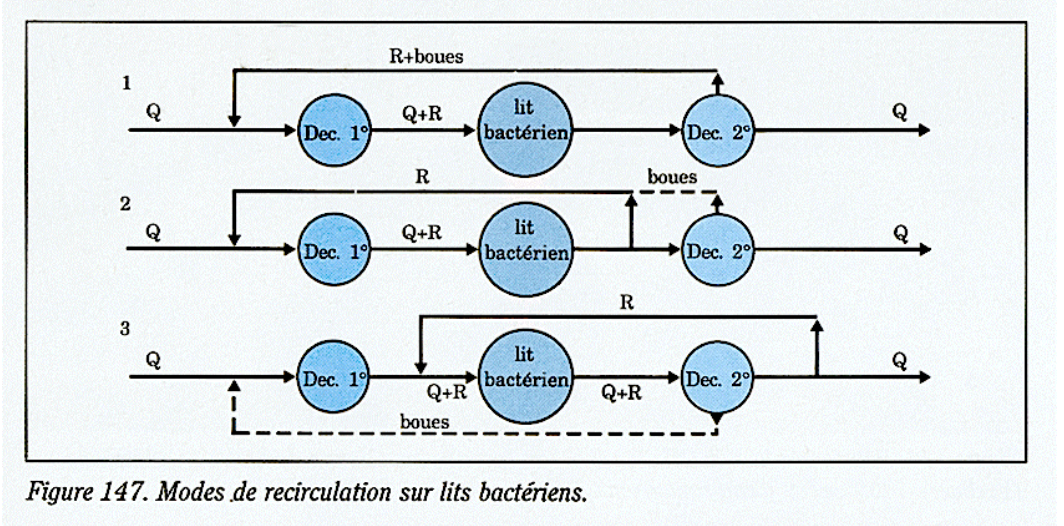


Figure 147. Modes de recirculation sur lits bactériens.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

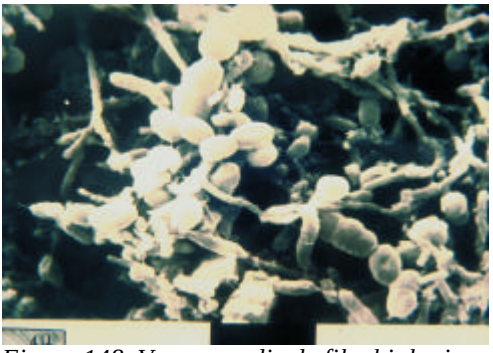


Figure 148. Vue agrandie de film biologique aérobie sur support granulaire (X *1000).*

2.2.3. Lits granulaires

L'activité d'une culture bactérienne dépend, en particulier, de sa surface d'échange avec le substrat et l'oxygène. Dans les boues activées, cette surface est restreinte du fait de l'état floculé des micro-organismes, état floculé qui est indispensable si on veut obtenir une séparation correcte boue-eau traitée dans l'ouvrage de séparation finale. Plus le floc est important, plus la diffusion du substrat et de l'oxygène vers les micro-organismes situés à l'intérieur est ralentie.

Dans les lits bactériens, la surface développée du matériau support, ramenée au m de réacteur, reste modeste et la parfaite répartition de l'eau à traiter sur la totalité du biofihn est délicate à l'échelle industrielle.

D'où l'idée de fixer les micro-organismes sur des supports granulaires de taille effective inférieure à 4 ou 5 mm, ces supports assurant une surface spécifique développée (et par conséquent une surface d'échange) très supérieure à celle des autres procédés. A titre d'exemple, une BIOLITE de TE 2,7 mm, développe une surface d'échange de 700 $m^2.m^{-3}$.. Un lit turbulent utilisant un support de TE égale à 375 µm, expansé de 100%

développe une surface d'échange de 6500 $m^2.m^{-3}$ de réacteur, à comparer

Figure 149. Réacteur à lit fixe (NITRAZUR) en largeur. Installation de LOUVECIENNES (Yvelines). Nitrification d'eau souterraine. Débit maximal: 5000 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

aux 100 ou 200 $m^2.m^{-3}$ d'un lit bactérien à remplissage plastique.

Il est alors possible de travailler à des charges volumiques élevées et ce avec des rendements épuratoires permettant sur des ERU d'obtenir, en une seule étape, un effluent traité satisfaisant aux normes de rejet habituelles.

Schématiquement, ces bioréacteurs à milieu granulaire peuvent se diviser en deux grandes catégories

- ceux dans lesquels, parallèlement à l'épuration biologique, on assure la rétention des MES initialement présentes dans l'effluent brut ainsi que les boues en excès produites. Ce sont les **lits granulaires fixes** appelés aussi **biofiltres**.
- ceux dans lesquels le bioréacteur n'assure que l'épuration biologique, la séparation des MES étant assurée par un ouvrage placé en aval. Dans ce dernier cas, afin d'optimiser les surfaces d'échanges micro-organismes substrat, on travaille avec des matériaux granulaires très fins, mis en mouvement. Ce sont les **lits granulaires mobiles.**

Les réacteurs à lits fixes peuvent être à flux ascendant ou à flux descendant selon le sens de passage de l'eau adopté. Suivant les sens relatifs de l'eau à traiter et du gaz d'oxygénation, on distingue aussi les réacteurs à **co-courant** et les réacteurs à **contre-courant**. Le matériau support granulaire est **régénéré** périodiquement par lavage au sein même du réacteur (figure 149). Il est à noter que le principe d'épuration des lits granulaires fixes peut être théoriquement étendu à des lits granulaires flottants réalisés avec des billes de faible densité.

Les **lits mobiles** peuvent être

- **de type fluidisé** avec apport d'oxygène préalablement dissous dans l'effluent recirculé, mais le contrôle de l'accroissement du film biologique nécessite un système d'extraction, de nettoyage et de recyclage du matériau; les charges applicables sont limitées par la capacité d'oxygénation;

Figure 150. Réacteur aérobie à lit granulaire turbulent, sucrerie BEGHIN-SAY, usine de THUMERIES (Nord).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **de type turbulent** avec introduction d'air directement dans le réacteur (figure 150). Un décanteur est indispensable en aval; les rendements d'épuration sont limités.

2.2.4. Autres systèmes

2.2.4.1. Les disques biologiques

Cette technique, encore appelée Rotating Biological Contactor (RBC) par les Anglo-Saxons, remonterait au 19e siècle avec les travaux de Weigrand sur le pouvoir épurateur des roues des moulins à eaux.

La biomasse est fixée sur des disques tournant autour d'un axe horizontal et baignant en partie dans l'eau à traiter (figure 151). De par la rotation, la biomasse se trouve donc alternativement en contact avec l'eau à traiter et l'oxygène de l'air.

La mise en rotation des disques est généralement assurée par un moteur électrique. Quelques réalisations prévoient une aide à la rotation et à l'oxygénation par une insufflation d'air complémentaire sous des godets solidaires de certains disques. Ceux-ci, réalisés en polystyrène, PVC ou feuilles de polyéthylène ondulées, ont un diamètre de 2 à 3 m. Ils sont espacés de 2 à 3 cm et leur vitesse de rotation est de 1 à 2 tours par minute.

Un clarificateur, dimensionné sur des vitesses ascensionnelles pouvant atteindre 2 $m.h^{-1}$ en pointe, doit retenir les boues en excès.

L'absence de brassage dans la cuve d'aération
- impose la présence d'un décanteur primaire,
- interdit la recirculation de boues depuis le clarificateur.

Les réalisations comprennent souvent plusieurs étages de disques, les premiers servant à l'élimination du carbone organique, les derniers pouvant servir à la nitrification. Les charges sont exprimées en g de $DB0_5$ par m^2 de surface de disque et par jour: en général, elles ne dépassent guère 25 à 30 $g/m^2.j$. Avec des charges nettement inférieures, une nitrification est envisageable mais la sensibilité à la température est grande.

Cette technique a l'avantage d'une faible consommation d'énergie électrique (2 à 4 $W.m^{-2}$ de disque), mais sa diffusion est très handicapée par
- la nécessité de stabiliser les boues (primaires et biologiques),

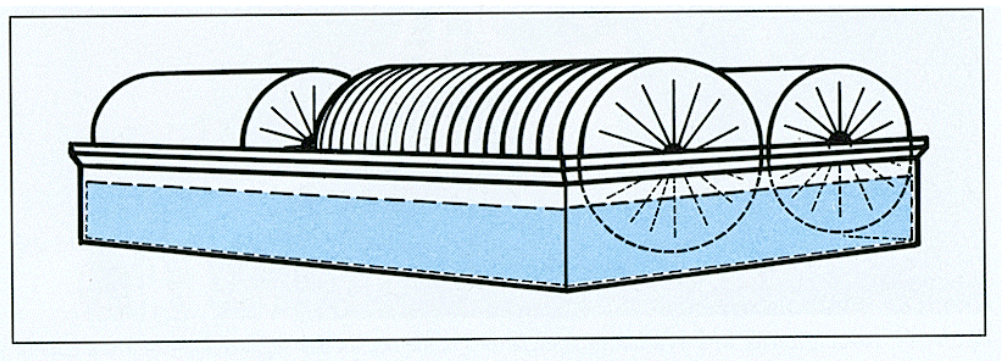


Figure 151. Disques biologiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- la grande difficulté d'obtenir en ERU un effluent traité à moins de 40-45 mg.l^{-1} de DBO_5, sans surcoût d'investissement important,
- la nécessité de couvrir les disques pour les protéger des intempéries.

2.2.4.2. Corps de contact immergés

Cette technique consiste à immerger dans un bassin de boues activées, une structure fixe ou flottante sur laquelle se développe une biomasse supplémentaire qui n'a pas à transiter par le clarificateur. Il est ainsi théoriquement possible d'améliorer les performances d'une installation d'épuration biologique sans accroître le dimensionnement du clarificateur qui peut être limité par le flux massique appliqué (voir page 164).

Une autre application, peut-être plus prometteuse, est celle de bassins de nitrification équipés de ces corps de contact, et placés en aval d'une station conventionnelle éliminant la pollution carbonée. Elle est à rapprocher d'une pratique assez courante au japon sur les petites stations, qui consiste à disposer à l'aval de celles-ci un bassin aéré de finition, équipé de modules en nids d'abeille, non suivi de décanteur.

Les critères de choix du corps de contact sont
- la surface spécifique: l'accroissement de la concentration en biomasse est en effet une fonction directe de cette surface; les procédés peuvent être classés à partir de ce critère qui conditionne toute la technologie de mise en oeuvre,
- la sensibilité au colmatage et les possibilités de nettoyage,
- la résistance à l'usure,
- le coût (matériau et montage).

Les procédés proposés se distinguent essentiellement par les matériaux mis en oeuvre:
- Matériaux plans. Ces procédés utilisent les remplissages plastiques semblables à ceux utilisés dans les lits bactériens. Les charges volumiques appliquées restent inférieures à 2 kg DBO_5/m^3.j. L'accroissement du taux de boues est de l'ordre de 20 à 40 % par rapport aux boues activées classiques.
- Matériaux filiformes. Les fils utilisés peuvent être mis en oeuvre de deux façons:
- par implantation directe des fils agencés de diverses manières (boucles, ramifications en touffes...), principalement représentée par la technique dite "ring-lace".
- par utilisation de cubes de 2 à 3 cm d'arête constitués de fils de polyuréthane réticulés.
L'inconvénient majeur de cette technique réside dans les risques particulièrement élevés de colmatage et d'agglomération, surtout sur des eaux contenant des fibres, filasses, graisses.
- Matériaux flottants.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. CULTURES BACTÉRIENNES ANAÉROBIES

3.1. BIOCHIMIE ET MICROBIOLOGIE DE LA MÉTHANOGENÈSE

La fermentation anaérobie est réalisée par des populations bactériennes complexes qui, dans des conditions d'environnement bien précises (potentiel redox autour de - 250mV, pH voisin de la neutralité), forment des associations stables. Elle est strictement anaérobie et conduit à la formation de méthane.

Elle se déroule normalement dans la nature lorsqu'une concentration élevée de MO est maintenue en anaérobiose: marais, sédiments de lacs, tractus digestif, etc.

En partant d'un cas simple comme le glucose, le bilan général de la digestion anaérobie peut s'écrire comme suit

$$C_6H_{12}O_6 + 0{,}2\ NH_3 \rightarrow C_5H_7NO_2 + 2{,}5\ CH_4 + 2{,}5\ CO_2 + 0{,}6\ H_2O$$

La méthanisation de la MO a lieu dans des écosystèmes "froids" (10-15 °C), mésophiles (30-40 °C) et même thermophiles (> 45 °C).

Les différentes voies de dégradation de la matière organique complexe en anaérobiose, peuvent être schématisées de la manière suivante (figure 152)

- **Étape d'hydrolyse et d'acidogénèse**

Elle est réalisée par des espèces extrêmement diverses: mésophiles ou thermophiles, anaérobies strictes ou facultatives.

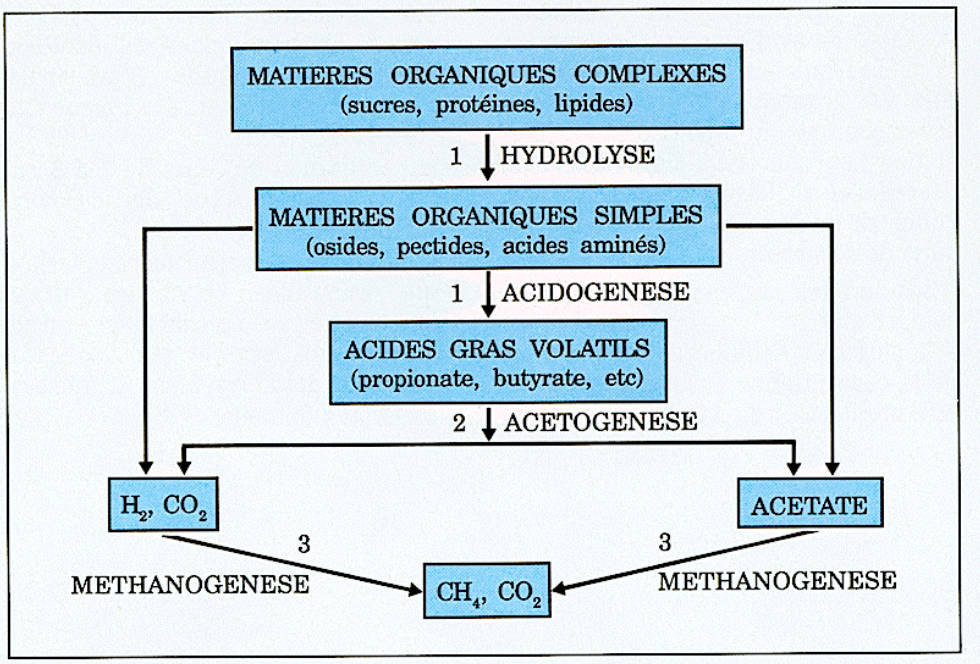


Figure 152. Dégradation des matières organiques en anaérobiose.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Cette première phase aboutit à un mélange d'acides gras volatils (AGV) : acétique, lactique, propionique, butyrique, etc., de composés neutres (éthanol), de produits gazeux CO_2 et H_2) et d'ammonium.

Ces micro-organismes ont souvent des temps de génération plus courts que ceux réalisant les étapes suivantes.

- **Étape d'acétogénèse**

Cette acétogénèse tout à fait particulière est réalisée par des bactéries productrices obligées d'hydrogène (ou réductrices obligées de protons). Elle se produit à partir des métabolites réduits de la phase d'hydrolyse et de fermentation (lactate, éthanol, propionate, butyrate). La déshydrogénation de ces composés est un processus qui, en l'absence de micro-organismes capables d'utiliser l'hydrogène (ou une combinaison de ce dernier avec le soufre par exemple pour former H_2S) est thermodynamiquement défavorable, voire impossible :

$$\text{Lactate} + H_2O \rightleftarrows \text{acétate} + 2\ H_2 + CO_2 + 4{,}18\ \text{kJ.mole}^{-1}$$

$$\text{Éthanol} + H_2O \rightleftarrows \text{acétate} + 2\ H_2 - 9{,}6\ \text{kJ.mole}^{-1}$$

$$\text{Butyrate} + 2\ H_2O \rightleftarrows \text{acétate} + 2\ H_2 - 48{,}1\ \text{kJ.mole}^{-1}$$

$$\text{Propionate} + 2\ H_2O \rightleftarrows \text{acétate} + 3\ H_2 + CO_2 - 76\ \text{kJ.mole}^{-1}$$

Cependant, aux très faibles pressions partielles d'hydrogène, la réaction devient thermodynamiquement possible et sa variation d'énergie est suffisante pour permettre la synthèse d'ATP et la croissance bactérienne.

Cette étape est donc sensible à la présence d'hydrogène. Ainsi pour la dégradation du propionate, intermédiaire thermo-dynamiquement le plus défavorable, la réaction n'est possible qu'à une pression partielle en hydrogène inférieure à 10 Pa.

- **Étape de méthanogénèse (stricto sensu)** Deux grandes voies de méthanogénèse peuvent être identifiées. L'une qui, à partir du couple H_2/CO_2, produit H_2O et CH_4, l'autre dite acétoclastique, qui dégrade l'acétate en CO_2 et CH_4. Cette dernière voie correspond à la production d'environ 70 % du méthane.

D'autres sources de carbone comme le méthanol, le formaldéhyde et les méthylamines pourront être utilisées par les micro-organismes méthanogènes

3.2. PARTICULARITÉ DES BACTÉRIES MÉTHANOGÈNES

Les bactéries méthanogènes sont anaérobies strictes. Elles sont caractérisées par la présence de co-enzymes ou de facteurs très spécifiques tel le **facteur F420** dont les propriétés de fluorescence permettent la mise en évidence de ces bactéries sous microscope équipé en W. Le facteur F 430 quant à lui renferme du nickel, élément indispensable à la croissance de ces populations.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les principaux genres sont les suivants:

Genre	**Substrats**
Methanobacterium	H_2/CO_2
Methanobrevibacter	H_2/CO_2
Methanococcus	H_2/CO_2
Methanosarcina	H_2/CO_2/acétate
Methanothrix	acétate

Les temps de doublement sont très différents suivant le substrat utilisé, de quelques heures pour les bactéries hydrogénophiles à plusieurs jours pour les bactéries acétoclastes.

Les constantes d'affinité vis-à-vis des substrats sont aussi très variables, ainsi des teneurs très faibles en acétate tendent à favoriser la présence de **Methanothrix** dans les écosystèmes anaérobies.

3.3. PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DE LA DIGESTION ANAÉROBIE

3.3.1. Le biogaz

La composition du gaz formé dépend de celle du substrat et des conditions de fonctionnement des fermenteurs (charge, temps de séjour). En première approche, les valeurs suivantes peuvent être prises en compte

CH_4 : 55 à 75 % H_2: 1 à 5%

CO_2: 25 à 40 % N_2 : 2 à 7%

D'autres produits peuvent être également présents, parmi lesquels H_2S et des thiols provenant du soufre minéral ou organique présent dans les effluents bruts et du NH_3 provenant des protéines de la biomasse. Ces constituants sont responsables de l'odeur désagréable caractéristique de ce gaz.

La quantité de CH_4 formé dépend également de la nature du substrat. Le tableau suivant donne quelques indications :

Substrat	**Production de CH_4 (m^3 kg^{-1} de substrat)**
Sucres	0,42 à 0,47
Protéines	0,45 à 0,55
Graisses	jusqu'à 1

En digestion de boues, la production de méthane sera de 0,6 à 0,65 m^3 par kg de MV réduite.

3.3.2. La production de boues

En traitement d'ERI, la production de biomasse en excès est comprise entre 0,10 et 0,15 kg MS par kg de DCO soluble éliminée. Cette valeur est faible comparée aux valeurs obtenues en traitements aérobies pour lesquels, selon la charge à laquelle on fonctionne, cette production varie entre 0,2 et 0,4 kg MS par kg de DCO soluble éliminée. C'est un des avantages des procédés anaérobies.

3.4. LA MISE EN OEUVRE

La digestion anaérobie peut se mettre en oeuvre selon de nombreuses variantes. Certaines techniques sont proches de celles utilisées en fermentation aérobie.

La culture bactérienne peut être développée en suspension libre ou fixée sur un support. Les techniques de digestion

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

avec bactéries en suspension libre sont les plus répandues à ce jour mais celles mettant en oeuvre des cultures fixées font l'objet d'un grand développement.

3.4.1. Les cultures libres

Une importante particularité des procédés de fermententation méthanique en cultures libres, réside dans la difficulté particulière de séparation de la fraction solide et du liquide interstitiel. La nature le plus souvent très ténue du floc biologique, le dégagement à l'intérieur même de celui-ci de gaz méthane sous forme de microbulles, la densité fréquemment élevée du liquide interstitiel, rendent la clarification délicate si elle est souhaitée. Celle-ci est nécessaire dans le traitement d'effluents si l'on désire enrichir le contenu du fermenteur en micro-organismes et réduire ainsi son volume par recyclage des boues décantées.

Cette clarification exige de grandes surfaces de décantation. Elle peut être facilitée par un refroidissement de la liqueur, ralentissant ou bloquant le dégazage (mais au détriment du rendement énergétique du système), par un dégazage préliminaire, par utilisation de l'effet filtrant du lit de boue ou par l'apport de réactifs de floculation.

En traitement d'ERI, les charges volumiques admises varient de 2 à 15 kg DCO/m^3.j. En traitement de boues, il est possible d'introduire, sur un digesteur haute charge, 2,5 kg de MV/m^3 j.

- **Granulation des boues**

Il est également possible d'utiliser en cultures libres certaines propriétés de granulation des biomasses anaérobies. Les granules proprement dits sont des agrégats de bactéries dont la taille peut atteindre jusqu'à 8 mm. Les propriétés de décantation de ces granules sont excellentes (0,5 à 3 cm.s^{-1}), ce qui permet le passage du liquide à traiter sans qu'il y ait entraînement notable de particules.

Le mode de formation de ces granules est loin d'être élucidé. Le rôle de microparticules inertes, servant d'initiateur de granulation a été mis en évidence. L'importance de la concentration en calcium (plus de 100 mg.l^{-1}) dans les phénomènes de consolidation du granulé, est souvent signalée. La présence d'amidon est également un élément favorable.

- **Digestion deux phases et sulfato-réduction**

Une autre technique également utilisée en cultures libres est celle de la digestion en deux phases. On sépare pour les optimiser les phases hydrolyse-acidification et acétogénèse-méthanogénèse. Cette séparation peut être envisagée plus particulièrement dans les cas suivants

- l'étape d'hydrolyse est limitante et nécessite une optimisation séparée (conditions de pH et de température). Exemple: déchets cellulosiques,
- la première phase risque d'être inhibitrice de la seconde. Exemples

a) acidification rapide de sucres simples pour laquelle la moindre variation de charge induira des fluctuations importantes du pH, b) risques de sulfato-réduction pour des concentrations en S supérieures à 200 mg.l^{-1} (toxicité de H_2S pour l'étape acétogénèse-méthanogénèse).

3.4.2. Les cultures fixées

A la différence des cultures libres, cette technique n'est pas applicable aux boues, pour des raisons pratiques d'exploitation (encrassement du support).

- **Utilisation de matériaux supports plastiques** (figure 153)

Les supports utilisés dans ce cas sont comparables à ceux utilisés en lits bacté-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

riens à ruissellement, mais ils sont immergés. Le pourcentage de vide élevé de ces matériaux limite considérablement les risques de colmatage, alors que la surface développée, relativement importante, permet de fonctionner avec des charges volumiques intéressantes, supérieures généralement à 10 kg/m^3.j. de DCO.

- **Utilisation de matériaux supports mobiles** (figure 154)

Les supports mobiles utilisés ont généralement une granulométrie de quelques centaines de microns. Ils sont mis en expansion par un courant d'eau ascendant. Ces réacteurs permettent un très bon échange substrat-culture, ainsi qu'une concentration en biomasse active élevée. Les charges volumiques qui leur sont applicables peuvent atteindre 50 kg/m^3.j. de DCO, voire plus sur certains effluents.

Un contrôle de l'accroissement de la masse bactérienne est nécessaire, de façon à éviter un trop fort allégement du matériau support ou un engorgement du lit

La méthanisation est bien adaptée à la mise en oeuvre de ces réacteurs à lit fluidisé ou expansé, mais une parfaite maîtrise de l'hydraulique du système est nécessaire.

Figure 153. Réacteur à lit fixe Anafiz. Laiterie Saint-Hubert. Usine de Magnières (Meurthe et Moselle).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 154. Pilote de méthanisation. Réacteur Anaflux

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 154. Pilote de méthanisation. Réacteur Anaflux

4. L'UTILISATION DES MEMBRANES EN TRAITEMENT D'EAUX RÉSIDUAIRES

Voir chapitre 15, page 851.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. SOLUTIONS EXTENSIVES

Les solutions extensives correspondent à des procédés d'épuration dans lesquels la concentration du réacteur biologique en organismes épurateurs est faible. Le système ne comporte pas de recyclage de liqueur bactérienne ni normalement de phase de clarification séparée. Les surfaces de terrain nécessaires sont considérables, mais la réalisation de l'installation de traitement est a priori très simple et nécessite peu d'équipements électromécaniques.

5.1. DIFFÉRENTS TYPES DE LAGUNAGE

5.1.1. Lagunage naturel (aérobie)

Le rayonnement solaire est la source d'énergie qui permet la production de matière vivante par les chaînes alimentaires aquatiques (chaînes trophiques).

La figure 155 schématise les principaux cycles biologiques se développant dans la lagune.

L'épuration des effluents est réalisée essentiellement par des **bactéries aérobies** dont l'oxygénation est assurée par l'action chlorophyllienne de végétaux qui participent aussi à la synthèse directe de la matière organique

- les **microphytes** ou algues microscopiques. Ce sont essentiellement des algues vertes ou bleues (voir page 402) difficilement séparables,
- les **macrophytes** ou végétaux macroscopiques qui comprennent des formes libres (ex. lentilles d'eau) ou fixées (ex. roseaux). Les jacinthes d'eau peuvent

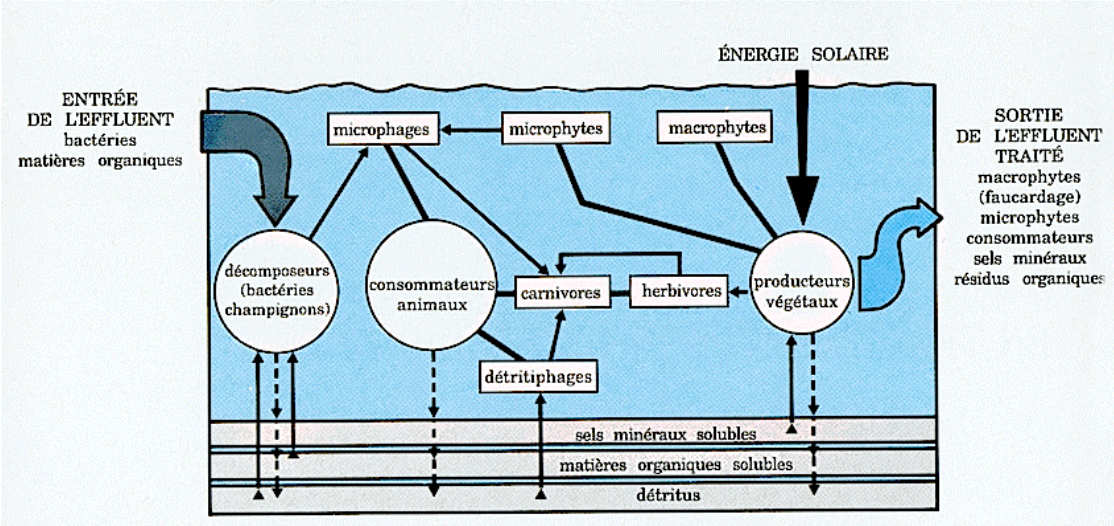


Figure 155. Cycles biologiques d'une lagune (d'après CEMAGREF).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

s'enraciner ou non. Les végétaux supérieurs jouent un rôle de support et doivent normalement permettre d'augmenter la quantité de bactéries et d'algues épuratrices.

Si, après plantation, il y a développement de macrophytes (fixés à rhizomes), ceux-ci assurent des échanges nutritionnels avec le sol, les sédiments et l'eau. Toute une faune prédatrice des bactéries, du phytoplancton, etc. se développe au sein des lagunes: protozoaires, cladocères, copépodes. Dans la zone aval, la vie piscicole peut être active.

Le lagunage naturel constitue ainsi un édifice biologique très complexe dont les équilibres ne sont pas toujours aisément maîtrisés.

5.1.2. Lagunage aéré

L'apport d'oxygène est essentiellement assuré de façon artificielle: aérateurs mécaniques flottants ou fixes, insufflation d'air. En l'absence d'un compartimentage bien délimité le réacteur biologique peut se rapprocher d'un système à mélange intégral. Les équilibres biologiques sont voisins de ceux du procédé classique par boues activées bien qu'un certain développement algal soit inévitable.

La concentration en micro-organismes est faible et la décantation du floc bactérien très médiocre. Les lagunes aérées sont souvent suivies de vastes lagunes de décantation (éventuellement équipées de systèmes d'évacuation des boues).

Le brassage provoqué par les aérateurs dans la partie aérée (puissance 2 à 5 W par m^3 de lagune) réduit fortement la présence des dépôts par rapport aux lagunes naturelles.

5.1.3. Lagunage anaérobie

Dans ces lagunes, le rendement d'épuration escompté dépend essentiellement du développement d'une fermentation méthanique. Il n'est, de ce fait, applicable que sur des effluents à forte concentration et, le plus souvent, à titre de prétraitement avant un deuxième stade d'épuration de type aérobie.

Les risques de nuisance sont particulièrement importants et ces lagunes deviennent inefficaces par basse température. Elles ne sont donc utilisables que dans des zones suffisamment isolées et avec des conditions climatiques favorables. Des dispositifs de couverture de ces lagunes, permettant de récupérer le gaz de digestion et de réduire les inconvénients propres au système, ont été mis en oeuvre sur certains effluents industriels.

Dans la réalité, la classification aérobieanaérobie des différents types de lagunes est un peu artificielle. En particulier le milieu liquide des lagunes aérobies n'est pas oxygéné dans son intégralité.

Dans les zones amont d'une lagune aérobie (surtout s'il s'agit d'une lagune naturelle fortement compartimentée), l'apport de pollution lié à l'arrivée de l'effluent brut provoque un déficit d'oxygène.

En outre, au voisinage du fond, se forment à la longue des dépôts constitués des matières en suspension les plus lourdes et de résidus de l'activité biologique. Dans ceux-ci se développent des phénomènes de fermentation anaérobie avec minéralisation de la matière organique et dégagement de CO_2, CH_4 (et éventuellement H_2S). Ces dépôts sont particulièrement importants en l'absence de brassage et sur des effluents contenant beaucoup de matières en suspension décantables.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans toute lagune, des phénomènes aérobies et anaérobies sont plus ou moins associés. Si, dans une lagune aérobie, une partie importante de la masse liquide est dépourvue d'oxygène et est le siège de développements bactériens anaérobies, la lagune est dite **facultative.**

Dans la tranche d'eau supérieure, l'élimination de la matière organique est due à l'action de bactéries aérobies et d'algues, dans les couches plus profondes elle provient de celles de bactéries anaérobies et de bactéries dites "facultatives" (adaptées aux deux milieux).

5.2. PERFORMANCES ET DIMENSIONNEMENT

Les lagunes sont mises en ceuvre pour l'élimination de la pollution organique, pour la réduction de la pollution bactériologique, ainsi éventuellement que pour la nitrification d'un effluent traité. La température est un paramètre de fonctionnement essentiel en particulier pour la décontamination bactérienne. La complexité des phénomènes biologiques se développant dans les lagunes naturelles ne permet pas de caractériser la cinétique de l'épuration par un modèle mathématique simple.

5.2.1. Lagunes naturelles

La profondeur des **lagunes naturelles** est faible de façon à permettre une pénétration suffisante de la lumière. La profondeur des lagunes à microphytes ne doit pas dépasser 1,2 à 1,5 m; elle doit d'autre part être supérieure à 0,80 m pour éviter le développement de macrophytes. Par contre, il est recommandé de limiter la profondeur à 0,30 m si l'on veut au contraire faciliter la croissance de ces macrophytes (lagune de finition par exemple).

Dans le climat tempéré français "moyen" un dimensionnement basé sur une charge journalière de 50 kg de DBO_5 hectare.jour (correspondant environ à 10 m^2 par habitant et à un temps de séjour de 50 à 60 jours)est une base assez habituelle de dimensionnement pour "convertir" environ 90 % de la DBO_5 à une température de 10-15 °C. La teneur en matières en suspension de l'effluent traité reste élevée et varie de façon très sensible suivant les saisons (de 50 à 150 $mg.l^{-1}$). Elle croit très fortement avec l'augmentation de l'ensoleillement. La $DB0_5$ totale d'un effluent urbain traité par lagunage est ainsi généralement supérieure à 50 $mg.l^{-1}$.

Si la lagune est une lagune de finition située en aval d'un traitement classique par boues activées, dans le but d'assurer sa décontamination bactérienne (réduction de 3 à 4 unités logarithmiques de la concentration bactérienne exprimée en germes-test), un temps de séjour d'environ 30 jours est normalement suffisant dans les conditions moyennes françaises si la température ne descend pas en-dessous de 15/20 °C. Cette température est également très importante si une nitrification est recherchée.

5.2.2. Les lagunes aérées

Les **lagunes aérées** peuvent présenter des profondeurs pouvant atteindre 2,5 à 3 m. La profondeur maximale admissible est dépendante de la puissance de brassage du système d'aération.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Une approche du temps de séjour nécessaire repose sur l'application du modèle de Monod dans un réacteur unique à mélange intégral (voir page 285). Si So et Sf sont les concentrations en $DB0_5$ de l'effluent brut et de l'effluent traité, on a :

$$\frac{Sf}{So} = \frac{1}{1 + K_T t}$$

où t est le temps de séjour en jours,
K_T dépend de la température T en °C selon la relation $K_T = K_{20}.1{,}07^{T-20}$ si T > 10 °C. Pour un effluent urbain K_{20} est voisin de 0,5 j^{-1}.

La température T_l dans la lagune peut être calculée par la relation :

$$(T_o - T_l) = \frac{(T_l - T_a)\ FA}{Q}$$

avec:
T_o : température de l'effluent à traiter en °C,
T_l : température dans la lagune en °C,
T_a: température de l'air ambiant en °C,
A : surface de la lagune en m^2,
Q :débit en $m3.h^{-1}$.
F est un coefficient variant de 0,5 à 1,2 dans les zones tempérées de l'hémisphère Nord.

En réalité le compartimentage de la lagune associé à une disposition rationnelle des aérateurs permet de bénéficier en partie de l'effet favorable des bassins en série. Par contre, le caractère dispersé du floc bactérien de faible concentration (faible âge des boues, et taux de stabilisation limité) ainsi que des développements d'algues ne permettent pas une bonne séparation des matières en suspension. En traitement d'ERU la concentration de l'effluent traité en MES peut varier ainsi de 50 à 250$mg.1^{-1}$.

L'aménagement d'une lagune de décantation à l'aval de la lagune d'aération permet de réduire ces valeurs. La DB05 soluble de l'effluent traité est faible et correspond à des réductions de 80 à 90 % pour des temps de séjour de l'ordre de 10 jours dans des conditions climatiques tempérées.

L'efficacité de la décontamination bactérienne dépend essentiellement du temps de séjour et de l'absence de passages préférentiels dans la lagune.

On voit donc que les lagunes aérées sont surtout intéressantes pour la dégradation de la pollution organique et que les lagunes naturelles sont particulièrement adaptées à la réduction de la concentration bactérienne d'un effluent ayant déjà traversé un étage d'épuration secondaire, d'où leur nom, alors, de lagunes "de stabilisation" (ou de "maturation").

5.2.3. Lagunes anaérobies

Les temps de séjour sont supérieurs à 20 jours et dépassent fréquemment 50. Les charges volumiques appliquées en $DB0_5$ sont de l'ordre de 0,01 $kg/m^3.j^{-1}$ et les rendements d'élimination peuvent varier sur une large plage de 50 à 80 %. La teneur en MES est élevée.

Une profondeur importante (5 à 6 m par ex.) est en principe un élément favorable au processus.

5.3 CONCEPTION ET ENTRETIEN DES LAGUNES

Le compartimentage et le fonctionnement de lagunes en série sont, plutôt favorables au bon rendement de lagunage.

Ces dispositions permettent en particulier de disposer successivement d'ouvrages correspondant à des écosystèmes et/ou à des processus épuratoires différents, mais les phénomènes d'anaérobiose avec dégagement de mauvaises odeurs peuvent être très importants si l'effluent brut est concentré.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Une étude géotechnique est indispensable avant le choix d'une solution de lagunage et l'étanchéité de la retenue est nécessaire. Les digues doivent présenter une pente maximale et être protégées contre le batillage (enrochements, revanche suffisante), surtout en lagunage aéré.

L'exploitation des lagunes est d'autant plus aisée que l'effluent à traiter est débarrassé des matières décantables et flottantes. Sur des ERU, la solution idéale consiste à installer en amont de la lagune un prétraitement et une décantation primaire (combinée par exemple avec une digestion anaérobie). Cependant, les contraintes économiques conduisent généralement à alimenter la lagune en eau non prédécantée. Les zones en amont de la lagune sont alors le plus souvent encombrées de dépôts vaseux importants pouvant être la source de nuisances.

Le curage systématique des lagunes est une contrainte essentielle d'exploitation qu'il faut prendre en compte dès le départ de l'étude. A l'évacuation des boues s'ajoute souvent, en particulier dans les lagunes naturelles, le faucardage des plantes aquatiques en excès

.

5.4. ÉPURATION PAR LE SOL

La première technique d'épuration des eaux usées des agglomérations a été celle des champs d'épandage. L'utilisation des sols comme système épurateur met à profit

- ses propriétés physiques et physicochimiques : filtration, adsorption, échange d'ions, pouvoir de rétention,
- ses propriétés biologiques: action de la microflore, des végétaux.

Le système épurateur est donc constitué à la fois du sol et des cultures. Certains éléments polluants sont évacués à l'atmosphère: une partie du carbone est transformée en gaz carbonique par la respiration bactérienne et par la transformation chlorophyllienne. D'autres sont exportés par les plantes: d'abord C et N, puis P, K, Ca, Mg et enfin, dans une faible proportion, les métaux lourds.

Les trois principaux modes de traitement par le sol sont l'irrigation, l'infiltration-percolation et le ruissellement contrôlé (voir figure 156).

Le tableau 45 donne les caractéristiques et performances habituelles de ces systèmes de traitement.

L'irrigation est le système le plus utilisé. L'eau est amenée par canal ou dispersée par arrosage. La nappe d'eau souterraine ne doit pas se trouver à une profondeur inférieure à 1 m environ, la perméabilité du sol doit être modérée et un drainage est souvent recommandé. Les quantités d'eau mises en oeuvre varient évidemment suivant le type de culture, la nature des sols et les conditions climatiques. L'apport hydrique nécessaire, incluant les précipitations, correspond au taux d'évaporation naturel et aux besoins des plantes (évapotranspiration et croissance). Il varie tout au long de l'année. Le bilan en éléments nutritifs est aussi à prendre en compte. Les charges organiques appliquées s'échelonnent en général entre 5 et 20 kg de $DB0_5$ par hectare et par jour.

La principale difficulté d'application des techniques d'irrigation, en dehors de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

les cultures annuelles, l'épandage n'est possible que 3 à 6 mois par an. Pour des prairies, l'épandage est impossible durant les périodes de précipitation et pendant les mois précédant la remise en pâturage. Les plantations d'arbres (peupleraies) sont plus tolérantes. Un plan précis de rotation des cultures irriguées doit être établi.

L'effluent brut est de préférence au moins décanté avant utilisation (voir page 81). La vitesse d'infiltration est d'autant plus constante et rapide que le traitement préliminaire de l'effluent est poussé.

Tableau 45. Caractéristiques et performances des principaux modes de traitement par le sol des ERU.

Traitement	**Charge hydraulique annuelle** m par an	**Charge hydraulique journalière** mm par jour	**Prétraitement nécessaire**	**Eau traitée** mg.l^{-1}		
				MES	**$DB0_5$**	**NTK**
Irrigation	0,5 à 3	3 à 10	Décantation primaire	< 5	< 5	3 - 5
Infiltration-Percolation	4 à 50	20 à 200	Décantation primaire	< 5	< 5	10
Ruissellement contrôlé	1 à 10	10 à 30	Dégrillage	< 20	< 15	5

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

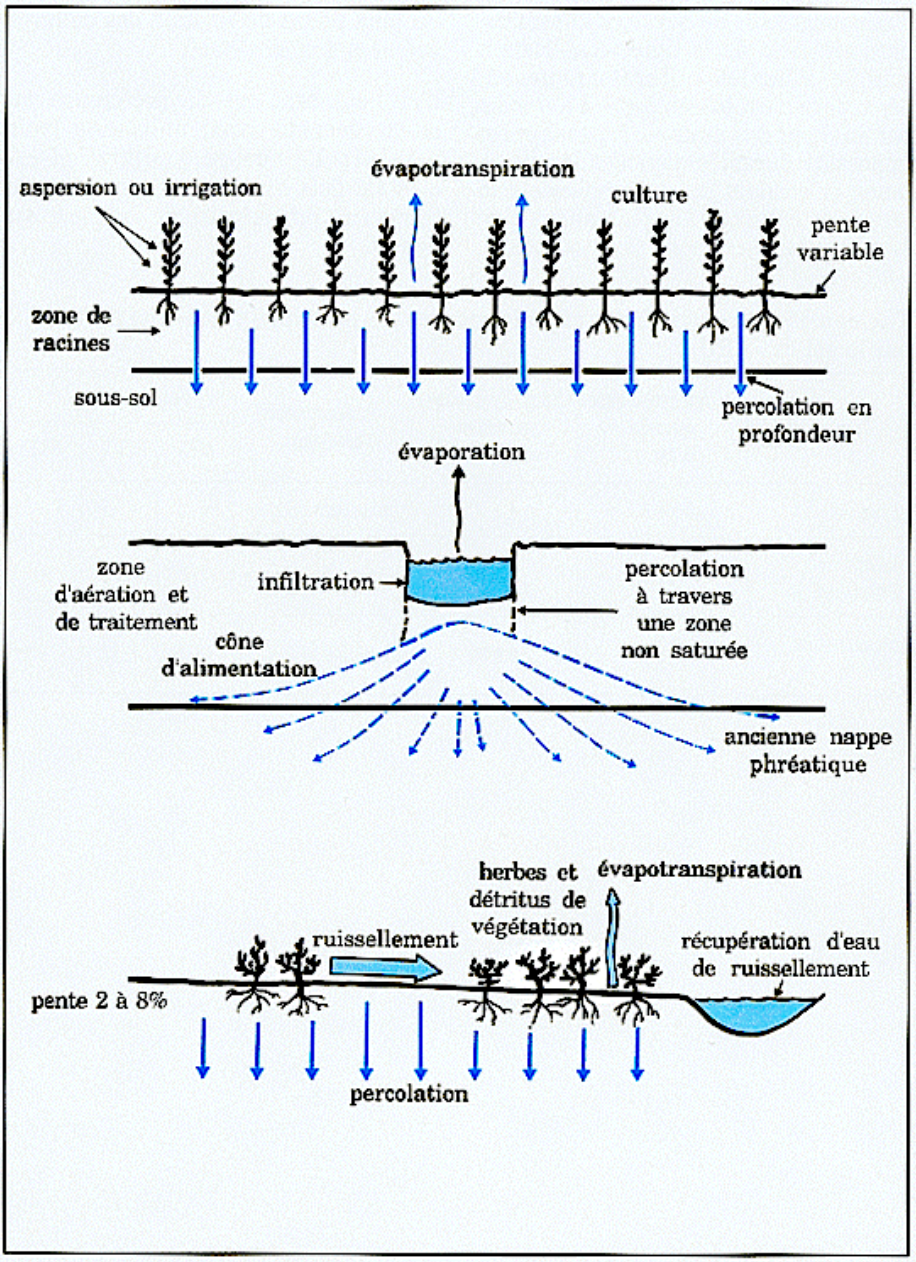


Figure 156. Traitements par le sol.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5
MÉTHODES ET MOYENS D'ANALYSE

1. GÉNÉRALITÉS

L'analyse est indispensable à l'élaboration d'un projet d'installation de traitement d'eaux ainsi que pour le contrôle de son fonctionnement et l'appréciation de la qualité de l'eau traitée (sortie station, réseaux, milieu naturel).

Les progrès incessants des techniques analytiques permettent d'améliorer la connaissance des constituants des eaux et de leurs effets.

Les normes de qualité sont de plus en plus sévères, les traitements de plus en plus sophis tiqués et le contrôle demande à être d'autant plus précis et fiable

1.1. PRÉCISION

La précision d'une méthode englobe plusieurs critères.

La justesse est l'écart entre la valeur vraie et la moyenne des résultats. Elle dépend des erreurs systématiques (interférences, échantillonnage, étalonnage).

La fidélité est jugée par la répétabilité (mêmes conditions opératoires par un même opérateur) et la reproductibilité (conditions opératoires différentes avec différents manipulateurs). L'expression statistique de ces écarts est donnée par l'écart type.

La sensibilité est donnée par l'écart mesurable par rapport à la grandeur à mesurer.

La limite de détection est la concentration minimale qui peut être détectée avec une probabilité de 95 %. Pour toutes les mesures spectrométriques, la limite de détection d'un élément est la concentration correspondant à deux fois le signal dû au bruit de fond de l'appareil.

Des méthodes statistiques plus poussées permettent d'intervenir sur des erreurs systématiques, de choisir des méthodes analytiques, d'élaborer des politiques de prélèvements (lieux et fréquences), etc.

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2. ANALYSES DE LABORATOIRE ET ANALYSES SUR SITE

Les législations sur la qualité des eaux suivent une évolution générale. Le nombre croissant des paramètres de qualité (62 pour la CEE en eau potable par exemple) et le niveau très faible de certains niveaux-guides (NG) contraignent les laboratoires à revoir les méthodes et les matériels utilisés. Le nombre croissant des contrôles que s'imposent les exploitants et les organismes sanitaires pousse les responsables à investir en matériels d'analyse fine (chromatographe, spectromètre d'absorption ou d'émission atomique, voire dans certains cas spectromètre de masse...).

Ce matériel analytique n'est évidemment pas adapté aux analyses sur le site qui font appel à

- une investigation avec des techniques analytiques simples et robustes (suivi de petites stations ou étude pour la conception d'une installation),
- une utilisation de systèmes compacts multicapteurs, avec traitement de données, portables et autonomes,
- un contrôle en continu (station d'alerte sur les eaux bettes, capteurs "qualité" sur les eaux traitées).

1.3. INFORMATISATION DU LABORATOIRE

Des programmes permettent actuellement de traiter les informations et les données d'analyse à des fins administratives et techniques.

. **Gestion administrative automatisée du laboratoire**

Des logiciels peuvent suivre un échantillon depuis son arrivée au laboratoire jusqu'au départ du bulletin de résultats. Il est possible de vérifier la cohérence de ceux-ci afin de valider automatiquement l'analyse.

. **Gestion technique**

Les résultats archivés peuvent être traités de façon statistique pour établir des bilans de qualité, l'évolution de paramètres dans le temps, des corrélations entre paramètres et informations (climatologie, traitements subis par les eaux, doses de réactifs), des cartes de qualité d'eau dans les réseaux. Il est possible en outre

- d'améliorer des chaînes de traitement,
- de choisir des points intermédiaires de traitement sur réseau (par exemple rechloration),
- d'établir des modèles mathématiques historiques pour l'aide à la décision dans des choix de traitement

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. LES PRÉLÈVEMENTS

Le premier objectif de l'échantillonnage est d'obtenir des prélèvements représentatifs de l'élément que l'on désire analyser (eau, matériau, boue, dépôt, gaz, réactif...).

L'eau doit être prélevée dans des bouteilles particulièrement propres et rincées plusieurs fois avec l'eau à examiner, sauf si la bouteille, provenant du laboratoire, contient un agent chimique: par exemple déchlorant (bactériologie) ou encore acide préservateur (métaux), etc.

Dans la plupart des analyses physico-chimiques d'eaux destinées à l'alimentation (eau de réseau, de forage...), il faut laisser couler le temps nécessaire à l'obtention d'une eau de qualité permanente. En ce qui concerne les eaux de lac ou de réservoir, le choix des points de prélèvement doit tenir compte des variations des paramètres à mesurer en fonction de la profondeur, de la saison, des vents, des pluies...

2.1. MODE DE PRÉLÈVEMENT

2.1.1. Prélèvement instantané

C'est le mode de prélèvement le plus fréquemment utilisé. Les flacons sont remplis sans agiter l'eau au contact de l'air.

Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un tuyau adapté à la prise d'échantillon et plongeant au fond de la bouteille, de laisser renouveler plusieurs fois le contenu de celle-ci puis boucher aussitôt Certaines analyses (oxygène, gaz carbonique, pH...) exigent d'éviter toute agitation et contact avec l'air. Les échantillons pour analyses

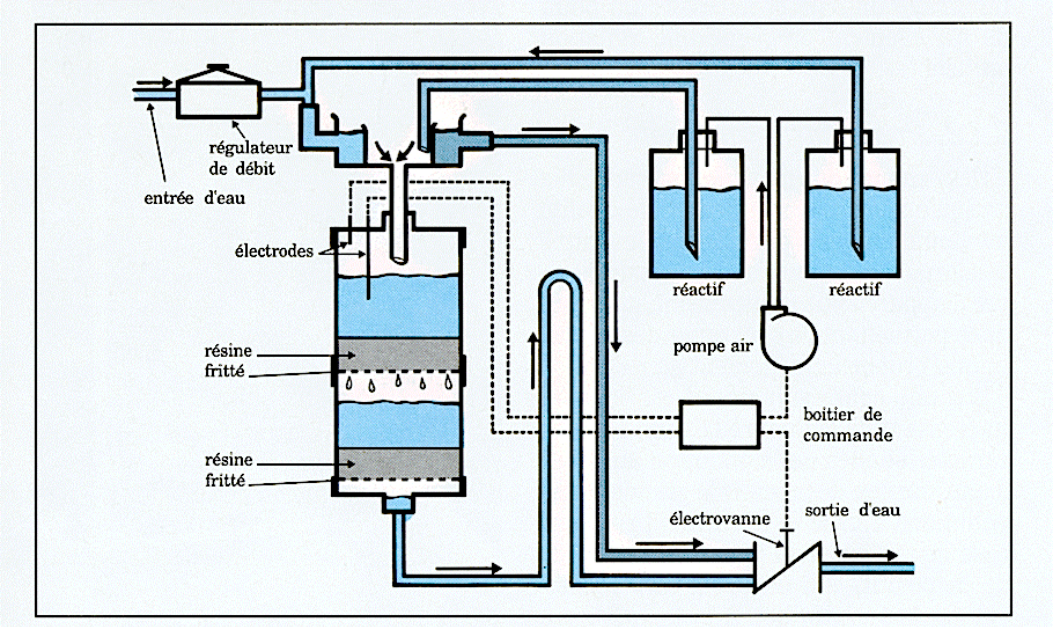


Figure 157. Système continu d'extraction sur résines macroporeuses.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

bactériologiques sont prélevés en flacons stériles après avoir flambé le point de puisage (robinet métallique) et laissé couler l'eau à débit constant pendant un minute environ sous la protection de la flamme avant de prélever. Il est indispensable de noter sur chaque échantillon la date, l'origine et la nature de l'eau.

Pour les eaux résiduaires, les variations journalières en quantité et en qualité rendent les échantillons instantanés insuffisamment représentatifs du flux polluant Des échantillons isolés sont prélevés lorsqu'on constate la présence d'éléments ou de concentrations inusités ou indésirables. Par exemple

- résidus toxiques tels que cyanures (à l'odorat), chrome, cuivre (à la coloration),
- huiles et graisses,
- résidus organiques concentrés provenant de laiteries, d'abattoirs, de papeteries, etc.

L'hétérogénéité des rejets rend l'échantillonnage difficile et nécessite un point de prélèvement où règne une agitation suffisante.

2.1.2. Prélèvement composite

Des échantillons moyens sont recueillis lorsqu'on cherche une mesure de qualité moyenne sur une période (par exemple 2 heures ou 24 heures). Un certain nombre d'appareils de prélèvement automatiques permettent de constituer des échantillons proportionnellement au débit.

Sur une eau résiduaire, il est souvent intéressant de connaître la variation des caractéristiques de la pollution au cours d'une journée, de préciser la grandeur des pollutions diurne et nocturne. Les appareils de prélèvement peuvent être munis de dispositifs qui assurent une conservation de l'échantillon à la température de+4°C.

2.1.3. Prélèvement avec concentration

Une étape de concentration-extraction est nécessaire pour la mesure de micropolluants organiques; elle peut être mise en oeuvre au laboratoire, mais à partir d'un faible volume ou, directement sur le site, au moyen d'appareils automatiques continus; dans ce cas, l'échantillon peut correspondre à la concentration de plusieurs centaines de litres prélevés sur plusieurs jours.

Trois types de matériel sont utilisés

- échantillonneur d'eau pour substances volatiles, en comb inaison avec un strippage en boucle fermée,
- système continu d'adsorption sur résines macroporeuses (figure 157),
- extracteur liquide-liquide en continu (figure 158).

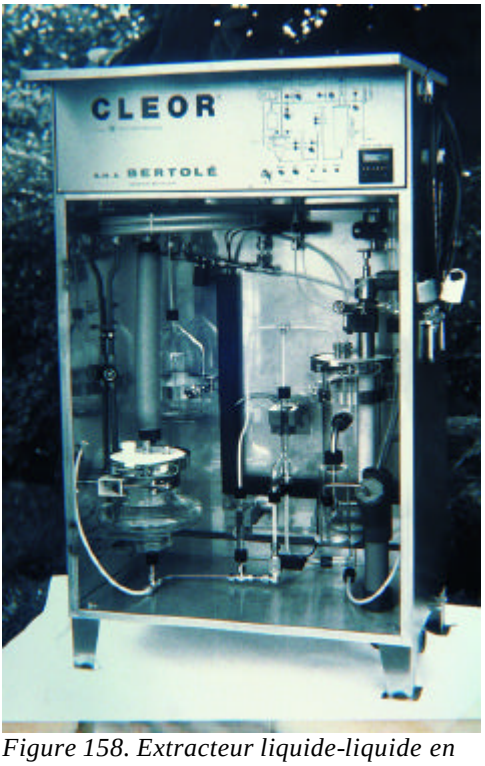


Figure 158. Extracteur liquide-liquide en continu. (Licence Lyonnaise des Eaux).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les deux derniers appareils peuvent fonctionner à plusieurs pH. Une cellule d'extraction est moins sensible à la présence de MES que des résines; par contre, ces dernières permettent de récupérer un plus grand nombre de composés (par exemple acides humiques). L'extracteur liquide-liquide a aussi l'avantage de donner des résultats mieux quantifiables et pose moins de problèmes de blanc.

2.2. CONSERVATION DES ÉCHANTILLONS EN VIDE DE L'ANALYSE

Les techniques de conservation mises en oeuvre sont diversifiées et permettent de limiter les évolutions physico-chimiques et bactériologiques des eaux sous analyse. Le choix des matériaux des flacons doit limiter les pertes par adsorption ou au contraire éviter les relargages en fonction des éléments à doser.

Le tableau 45 indique les principaux modes de conservation des échantillons en fonction des paramètres à doser.

Tableau 45.Eaux naturelles et potables :
Conservation des échantillons

Détermination	**Flaconnage**	**Conditions de conservation conseillées**	**Temps maximaux de non évolution**
pH	250 ml pyrex	Analyse sur place de préférence	24 heures
TH, TAC, Cl^-, NO_2^-, $N0_3$-, NH_4^+, SO_4^{2-} couleur, MES, résidu sec	2 1 plastique ou pyrex	Réfrigération à 4 °C	48 heures
Dégustation	11 pyrex	Réfrigération à 4 °C	Inférieur à 24 heures
Oxygène dissous	125 ml pyrex	1 ml solution A ($MnSO_4$) 1 ml solution B (KI) (voir méthode Winkler) Réfrigération à 4 °C	12 semaines
Détergents, $P0_4^{2-}$	250 ml	1 ml H_2SO_4 - 1/2 - Réfrigération 4 °C et obscurité	4 semaines
CN^-	11 pyrex	2 ml NaOH pH 10 Réfrigération 4 °C et obscurité	24 heures
Al, B	250 ml plastique	5 ml HNO_3	4 semaines
Métaux lourds	11 plastique	5 ml HNO_3	4 semaines
COT	125 ml pyrex	2 ml H_2SO_4 pH 24 °C	1 semaine

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 45.Eaux naturelles et potables :
Conservation des échantillons **(suite).**

Détermination	**Flaconnage**	**Conditions de conservation conseillées**	**Temps maximaux de non évolution**
Hydrocarbures	1 l pyrex	2 ml H_2SO_4 pH 2 4 °C	24 heures
Phénols	1 l pyrex	1,5 ml H_3PO_4 et 10 ml solution $CuSO_4$ à 10%	1 semaine
NTK	1 l pyrex	2 ml H_2SO_4 1/2 à 4 °C à l'obscurité	1 semaine
HPA et pesticides	2 l pyrex	Réfrigération 4 °C à l'obscurité	1 semaine
Halométhanes	30 ml	0,5 g thiosulfate et à remplir jusqu'à l'épaulement	1 semaine
Bactériologie	250 ml ou 500 ml	Flacons stériles avec thiosulfate - Réfrigération à 4 °C impérative	24 heures
Algologie	1 1 pyrex	40 ml de formol - Réfrigération à 4 °C et obscurité	1 semaine
DCO	1 1 pyrex	2 ml H_2SO_4	1 semaine
DBO	1 1 pyrex	Réfrigération 4 °C ou 2 ml H_2SO_4	6 heures 1 semaine

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. LES ANALYSES

3.1. ANALYSES SUR SITE

Certains paramètres peuvent évoluer pendant le transport des échantillons au laboratoire et il est toujours préférable de faire ces déterminations sur le terrain pH, température, O_2, CO_2, H_2S, NH_3, potentiel d'oxydo-réduction, oxydants résiduels... La mesure de ces paramètres repose souvent sur des méthodes de précision inférieure à celle des méthodes de laboratoire mais l'intérêt de la mesure immédiate peut être prépondérant compte tenu des variations susceptibles d'intervenir durant le transport et la conservation en laboratoire. Par ailleurs, ces analyses sont aussi nécessaires lors de l'étude prolongée d'une eau brute ou d'un effluent en vue de l'établissement d'un projet ou de l'optimisation d'une installation de traitement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 159. Trousse Degrémont pour piscine.

3.1.1. Méthodes potentiométriques

Ces méthodes mettent en oeuvre le plus souvent des électrodes spécifiques qui sont utilisées par immersion dans l'eau; elles permettent de mesurer: pH, potentiel d'oxydo-réduction, oxygène, turbidité, résistivité, fluorures, cyanures... Le couplage de ces sondes à une unité centrale de saisie de données (microprocesseur ou micro-ordinateur) permet de suivre sur le site l'évolution de la qualité de l'eau dans le temps.

3.1.2. Méthodes colorimétriques

Ces méthodes mettent en jeu des "réactions colorées" dont l'intensité de la couleur obtenue est évaluée au moyen de comparateurs possédant des disques, plaquettes ou bandes colorées servant d'étalons.

3.1.3. Méthodes volumétriques

De nombreux paramètres sont déterminés par volumétrie (alcalinité, dureté totale, dureté calcique, chlorures...). Des mallettes contenant de la verrerie classique de laboratoire permettent ces déterminations (burettes, erlenmeyer, éprouvettes graduées, fioles...).

3.2. INVESTIGATIONS DE LABORATOIRE

3.2.1. Concentration des échantillons

Les méthodes de concentration par extraction sont essentiellement utilisées pour l'analyse des micropolluants organiques. Quatre techniques peuvent être citées

- extraction liquide-liquide et concentration du solvant. Le choix du dichlorométhane est souvent retenu pour les déterminations ultérieures des pesticides et des HPA,
- extraction de composés volatils par la technique de strippage en boucle fermée (CLSA),
- extraction de composés volatils et semi-volatils par la technique d'extraction-distillation simultanée (SDE),
- cryométrie.

3.2.2. Examen gustatif

Pour une meilleure appréciation des goûts des EP, les techniques de dégustation sont de plus en plus utilisées aussi bien en recherche qu'en contrôle. Deux d'entre elles peuvent être citées

- détermination du seuil de goût (AFNOR T 90 03 5). L'eau est diluée avec de l'eau sans goût La dégustation est effectuée en commençant par les dilutions les plus grandes jusqu'à l'apparition du goût. Le seuil correspond à ce taux de dilution qui doit être perçu par la majorité des opérateurs (équipe d'au moins trois),
- détermination du profil **de "flaveur".** Cette méthode apporte plus d'informations que la précédente. Un groupe (panel) de dégustateurs entraînés et confirmés (quatre opérateurs minimum) établit un profil d'odeurs, de goûts et de sensations notés chacun sur une échelle d'intensité de 0 à 12. Leurs natures doivent être identifiées parmi une liste de descripteurs.

3.2.3. Gravimétrie

Son principe est basé sur la mesure d'une masse égale ou directement proportionnelle à l'élément recherché. Parmi les applications, la mesure des MES, après séparation solide-liquide, est un exemple. La détermination des ions $S0_4^{2-}$ peut être effectuée par précipitation de $BaSO_4$

Ces méthodes sont évidemment limitées par la précision des balances.

3.2.4. Volumétrie

Par définition, il s'agit de la mesure d'un volume d'une solution titrée proportionnel à l'élément recherché. Les réactions mises en oeuvre peuvent être

. **Neutralisation acide** base

Lors de la détermination du TA, et du TAC par exemple, l'acide titré utilisé est l'acide sulfurique. Des indicateurs colorés ont été choisis en fonction du pH de leurs virages.

. **Précipitation**

L'exemple de la précipitation du chlorure d'argent par une solution titrée de nitrate d'argent peut être cité. La fin de réaction est mise en évidence par la couleur rouge du précipité de chromate d'argent, sel plus soluble que le chlorure d'argent.

. **Oxydo-réduction**

Dans les cas de l'oxydabilité au permanganate et de la DCO, les oxydants permanganate et bichromate de potassium sont introduits en excès par rapport

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

aux matières organiques réductrices que l'on cherche à titrer. Un réducteur titré (sel de Mohr par exemple) permet de doser l'oxydant restant. La fin de réaction est une nouvelle fois indiquée par un changement de coloration.

. **Complexométrie**

Le TH est déterminé par la complexation des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} avec une solution titrée complexante EDTA. La fin de réaction est également colorimétrique.

3.2.5. Néphélométrie

La mesure de turbidité utilise ce principe (figure 160). Les particules contenues dans une eau diffusent plus ou moins la lumière. Si un observateur est placé sous un angle de 90° par rapport au rayon incident, il reçoit une quantité de lumière fonction des particules présentes. Certains appareils comparent la lumière diffusée à la lumière transmise pour tenir compte de matières qui diffusent peu la lumière. Les turbidités trouvées sont comparées à des étalons (l'AFNOR, l'ASTM et l'ISO ont choisi la formazine) et exprimées en NTU (Nephelometric turbidity unit, équivalente à JTU -Jackson - ou FTU - Formazine).

Cette mesure demande des précautions : éviter les bulles d'air, faire des dilutions pour les fortes turbidités. Des mesures comparatives de turbidité ne doivent être effectuées que sur un même appareil.

3.2.6. Ampèrométrie

Les oxydants tels que chlore, dioxyde de chlore ou ozone peuvent être dosés par ampèrométrie. Un courant de dépolarisation entre deux électrodes est proportionnel à la concentration de l'oxydant Cette propriété permet des dosages en continu sur les réseaux d'eau. En laboratoire, pour des raisons de précision, un réducteur (oxyde de phénylarsène) est introduit, abaisse le courant jusqu'à un palier caractéristique de fin de réaction; cette méthode est en fait une volumétrie dont la fin de réaction est mise en évidence par ampèrométrie.

3.2.7. Ionométrie

La différence de potentiel mesurée entre une électrode spécifique et une élec

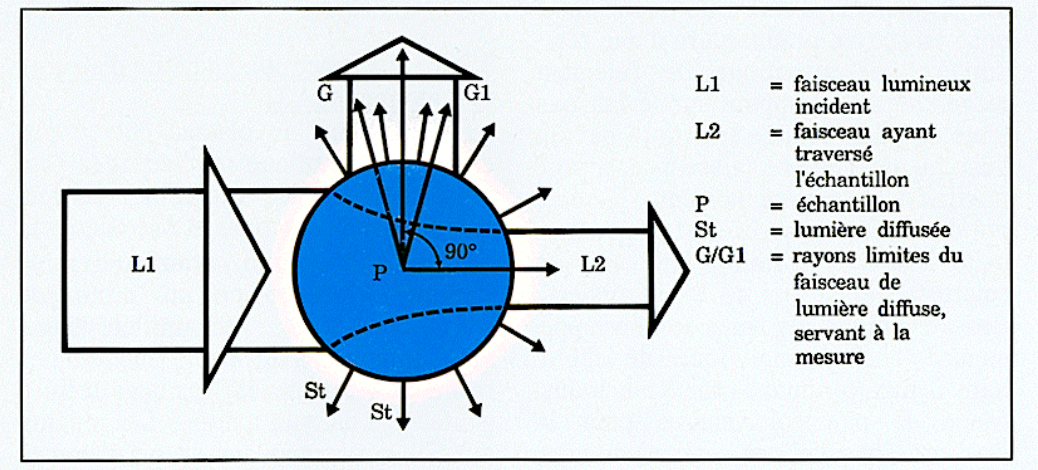


Figure 160. Principe d'un turbidimètre.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

trode de référence est une fonction logarithmique (loi de Nernst) de l'activité de l'élément recherché. L'électrode de mesure du pH, électrode à membrane de verre, reste le meilleur modèle d'électrode spécifique. L'ionométrie est également utilisée pour la mesure du potentiel d'oxydoréduction.

La mesure Tonométrique permet, grâce à un jeu d'électrodes spécifiques et d'un ionomètre (pHmètre performant), la mesure d'une quinzaine d'ions. De plus, le couplage des électrodes spécifiques comme électrodes indicatrices dans un dosage potentiométrique donne des résultats très précis.

Les électrodes pour mesure des ions F^- et CN libres sont les plus utilisées. Les électrodes spécifiques sont de plus très utiles pour les analyses d'éléments sur le terrain mais elles impliquent cependant de maintenir la température de l'eau sous analyse constante et d'imposer au milieu une force ionique donnée.

3.2.8. Spectrophotométrie

3.2.8.1. Spectrophotométrie d'absorption moléculaire

C'est la méthode analytique la plus utilisée en analyse d'eau. Elle nécessite la mise en oeuvre préliminaire d'une réaction colorée spécifique de (élément recherché. Elle s'appuie sur le fait que toute solution colorée traversée par un faisceau de lumière laisse passer une fraction de la lumière incidente; la quantité de lumière absorbée est proportionnelle à la concentration du composé coloré recherché (loi de Beer-Lambert). Cette technique a permis le développement de chaînes analytiques de laboratoire à flux continu, l'utilisation industrielle de photocolorimètres pour la mesure "séquentielle-en continu" de nombreux paramètres (silice, ammonium, etc.).

3.2.8.2. Spectrophotométrie d'absorption UV et IR

Dans le domaine de l'eau, ces techniques sont surtout utilisées pour quantifier des familles de M0.

La mesure de **l'absorption UV à 254 nm** est un indice caractéristique des substances possédant une ou plusieurs doubles liaisons.

La même mesure à d'autres longueurs d'onde complète l'examen (par exemple, acides humiques).

La mesure du COT (NF T 90102) fait intervenir une minéralisation du carbone organique par oxydation chimique et UV (figure 161) ou par combustion et une détection du CO_2 par IR. La limite de détection de la méthode est de 0,2 $mg.l^{-1}$ et la précision est de 10 % (figure 161).

L'indice CH_2 permet de mesurer les pollutions par les hydrocarbures, on fait en général appel à une technique fondée sur l'absorption des liaisons - CH, - CH_2, - CH_3, dans le domaine infrarouge compris entre les nombres d'ondes 2 800 et 3 000 $cm.^{-1}$. Plusieurs méthodes opératoires existent dont les champs d'application peuvent être incertains et l'interprétation difficile.

3.2.8.3. La spectrophotométrie d'absorption atomique (AA)

Les atomes d'un plasma obtenu par excitation thermique ou électrique peuvent absorber des radiations de longueurs d'onde discrètes et spécifiques.

Dans **l'absorption atomique avec flamme** (air/acétylène ou protoxyde d'azote/acétylène), (échantillon d'eau qui contient les éléments métalliques recherchés, est dispersé en nuage de fines goutelettes dans la flamme. Les métaux ainsi libérés forment un plasma d'atomes libres (figure 162).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans le cas de **l'atomisation sans flamme,** obtenue par voie électrique, les volumes utilisés sont plus faibles. Le dispositif d'atomisation est constitué d'un tube de graphite que l'on chauffe à une température comprise entre 1500 et 2 800 °C. Il a pour objectif de produire une vapeur atomique à partir de l'échantillon d'eau.

3.2.8.4. La spectrophotométrie d'émission de flamme

La pulvérisation d'une solution d'eau contenant des métaux dans une flamme se caractérise par une décomposition et une dissociation à l'état atomique des traces métalliques. Les atomes des métaux sont ainsi excités thermiquement par la flamme, et leur retour à l'état fondamental

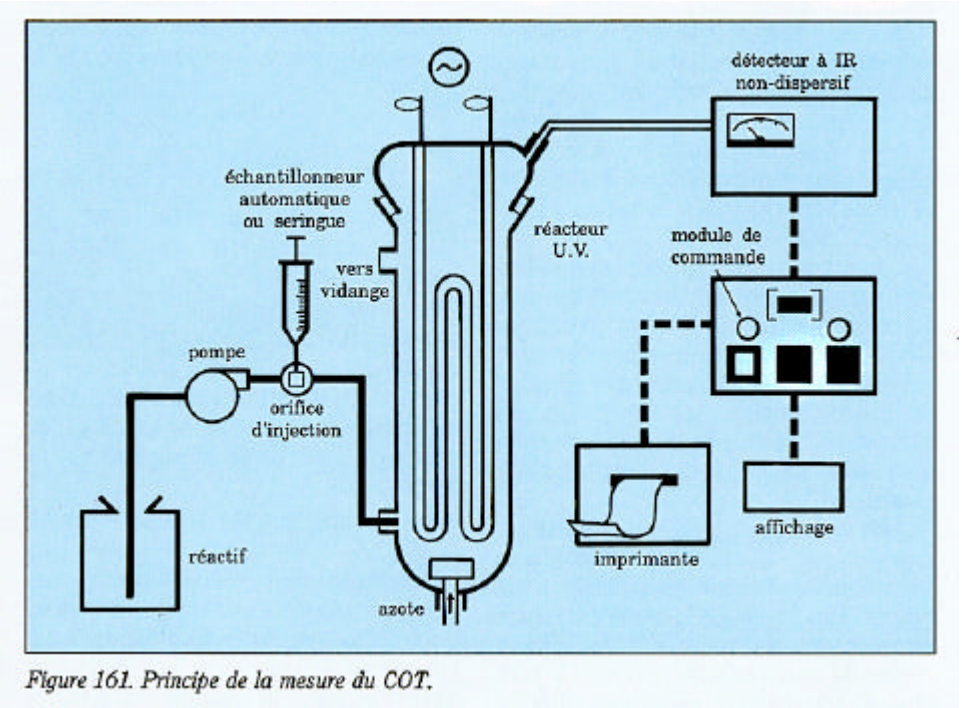


Figure 161. Principe de la mesure du COT.

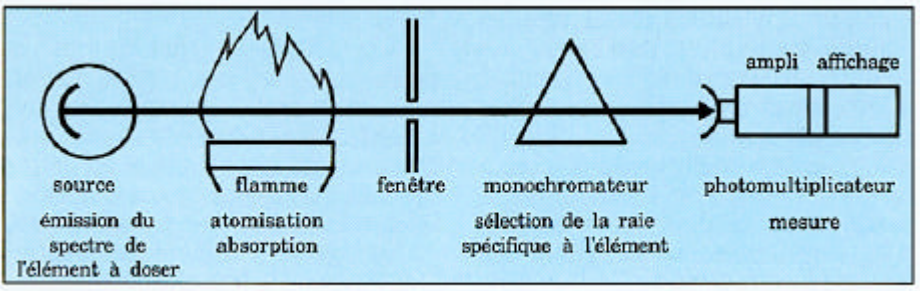


Figure 162. Principe de la spectrométrie d'AA.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

s'accompagne de l'émission d'une radiation dont la longueur d'onde est spécifique de l'élément recherché et dont l'intensité est directement proportionnelle à la concentration. Cette technique est appropriée pour le dosage direct des éléments alcalins: Na, K, Li.

3.2.8.5. Spectrophotométrie de plasma à couplage inductif (ICP)

La spectroscopie de plasma à couplage inductif est une technique qui fait appel aux phénomènes d'émission atomique dont la source d'atomes est un plasma d'argon. A haute température, il se forme au sein de l'argon un mélange d'atomes et de particules chargés suivant un équilibre $Ar \rightleftarrows Ar^{+} + e^{-}$.

Le plasma est produit par voie inductive par un générateur haute fréquence.

Sa température varie entre 6 000 et 8 000 °C. Les éléments recherchés sont introduits dans le plasma et transformés en vapeur atomique et éventuellement ionique par excitation lors de leur collision avec les éléments constitutifs du plasma.

Cette technique a un champ d'application plus large que l'absorption atomique sans flamme mais son pouvoir de détection est plus faible. La haute température du plasma permet de limiter les interférences de matrices et de ce fait l'ICP peut être très largement employée pour la recherche des métaux lourds dans les boues de station d'ERU dont les matrices sont très riches en éléments organiques et nécessitent une étape de minéralisation en milieu acide.

Tous les spectrophotomètres comportent un système de dispersion de la lumière pour le choix de la longueur d'onde appropriée ainsi qu'un photomultiplicateur pour la mesure de l'intensité reçue.

3.2.9. Fluorescence

La fluorescence est un phénomène de luminescence: des molécules émettent un rayonnement dans toutes les directions grâce à l'énergie reçue d'une lumière incidente. Elle est la propriété des composés cycliques aromatiques.

Sa mesure s'effectue à partir de spectrofluorimètres avec lumière incidente UV et lecture à 90° en lumières UV et visible.

3.2.10. Chromatographie

Pour l'identification et le dosage des M0, on a, en général, recours à des techniques chromatographiques.

En chromatographie en **phase gazeuse (CG),** la technique **en colonne capillaire est utilisée** en raison de son pouvoir de résolution inégalé, de la disponibilité de détecteurs universels et de son couplage aisé à la spectrométrie de masse (SM).

Un chromatographe en phase gazeuse ou liquide comporte trois parties: un injecteur, une colonne de séparation et un détecteur. Après avoir introduit l'échantillon au moyen d'une microseringue par l'injecteur, la séparation des molécules s'effectue dans la colonne en fonction d'un gradient de température.

A leur sortie de la colonne chromatographique, les composés séparés passent individuellement dans un détecteur dont la fonction est de donner un signal (sous forme de pic) dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de composé injecté, ce qui permet d'assurer, par le biais d'un étalonnage, une analyse quantitative. Les détecteurs universels présentent une sensibilité moyenne pour la plupart des

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

composés organiques, alors que les détecteurs "spécifiques" donnent une réponse beaucoup plus intense pour certaines familles chimiques.

Le détecteur universel par excellence est celui à ionisation de flamme (FID). Des détecteurs spécifiques sont le détecteur à capture d'électrons (ECD) sensible aux composés halogénés, le détecteur thermo-ionique pour des composés azotés et phosphorés, le détecteur à photoionisation (PID) pour des composés aromatiques.

La chromatographie en phase liquide haute pression (HPCL) utilise normalement pour phase mobile des solvants aqueux ou organiques. Les techniques de mise en oeuvre sont plus diversifiées qu'en phase gazeuse. La chromatographie en phase inverse qui utilise une phase liquide polaire pour éluer une colonne contenant une phase apolaire permet de déterminer les HPA. La chromatographie ionique (par échange d'ions) permet de séparer un grand nombre de cations et d'anions.

La **chromatographie d'exclusion** sépare sur gel poreux des composés en fonction de leur taille, et permet de déterminer leur poids molaire apparent; des fractions de poids molaires différents sont ainsi disponibles pour des analyses complémentaires.

3.2.11. Polarographie

La polarographie est basée sur le suivi de courbes intensité de courant-potentiel. Entre deux électrodes (l'une polarisable généralement à goutte de mercure et (autre de référence), l'intensité de courant est enregistrée en fonction d'une variation continue de potentiel. La différence d'intensité entre deux paliers est proportionnelle à l'élément oxydé ou réduit. Une des principales applications est l'analyse des cations métalliques et de leurs "spéciations" (degrés d'oxydation, complexation). Des variantes de cette technique améliorent sa sensibilité.

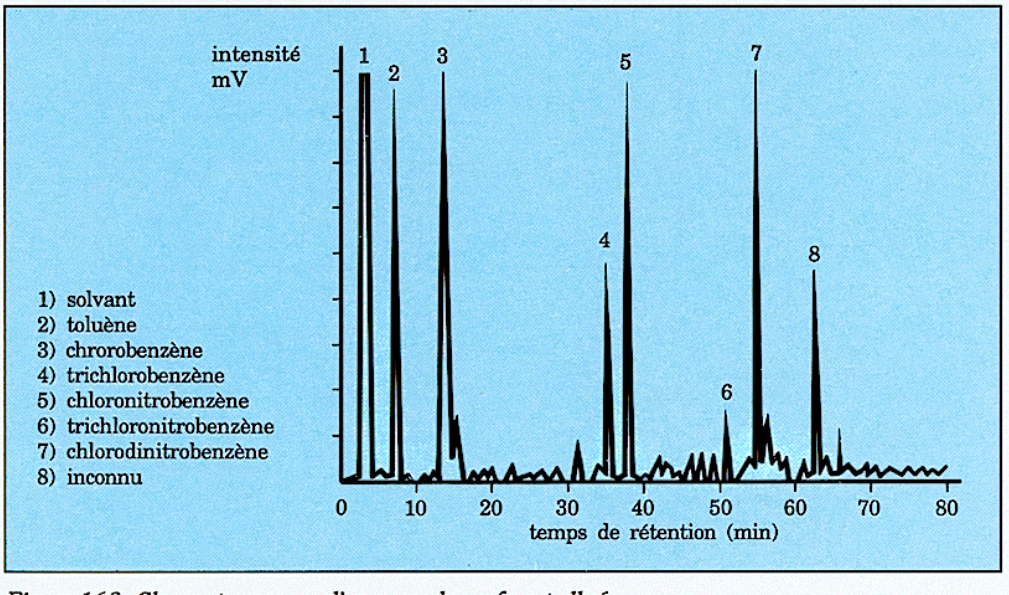


Figure 163. Chromatogramme d'une eau de surface polluée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.12. Spectrométrie de masse
(SM)

L'utilisation d'un couplage CG-SM permet le dosage des différentes familles de composés chromatographiables en phase gazeuse en utilisant un seul solvant d'extraction (ex.: le dichlorométhane) et une seule séparation chromatographique.

Les composés sortant du chromatographe sont fragmentés par un bombardement d'électrons. L'ensemble des ions détectés (masse/charge) constitue le spectre caractéristique de la molécule. L'ordinateur vient au secours du technicien pour l'exploitation des spectres. Ce détecteur est le plus performant car il permet une identification des molécules
même en cas de mauvaise séparation sur la colonne, d'où l'intérêt de la spectrométrie de masse par rapport aux détecteurs spécifiques (figure 164).

3.2.13. Mesure de la radioactivité

Pour le contrôle des eaux de distribution, les déterminations se font généralement sans séparation chimique préalable

- activité globale α,
- activité globale β,
- spectrométrie γ.

Dans les cas plus complexes, on procède à des radioanalyses détaillées après séparation chimique. Pour le contrôle des eaux, seules les activités β et γ sont généralement prises en compte pour suivre l'évolution de la radioactivité; toutefois, la radioactivité de l'eau est toujours faible et, de ce fait peu d'appareils font des comptages corrects. Les types de détecteurs les plus utilisés sont

-compteur à gaz utilisant l'ionisation (compteur Geiger-Muller, compteur proportionnel),

-détecteur à scintillations ou semiconducteurs, sensible aux rayonnements.

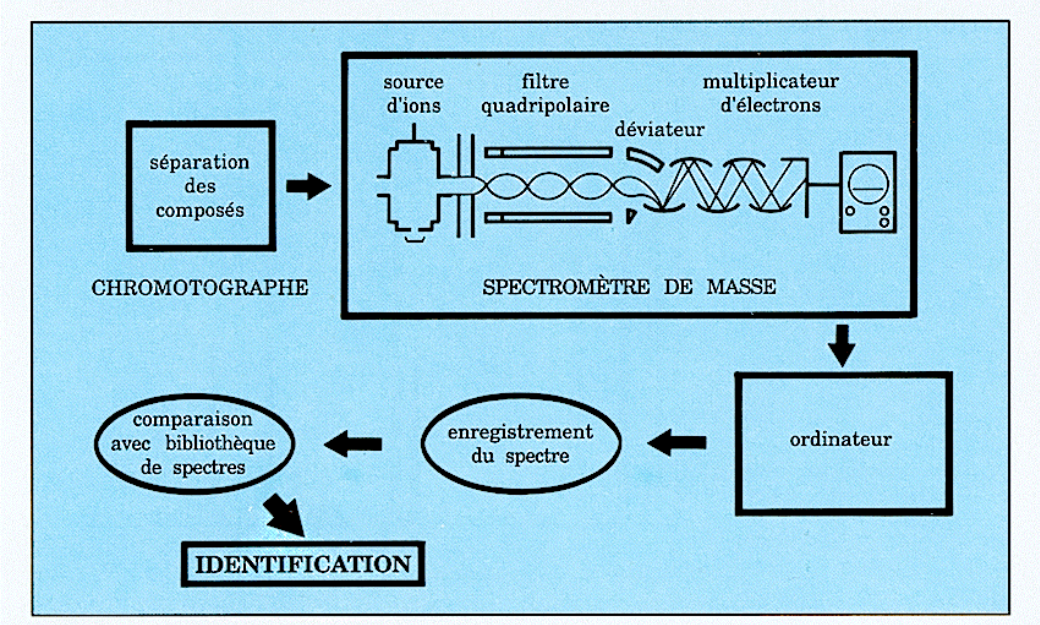


Figure 164. Principe de l'utilisation de la spectrométrie de masse.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.14. Combinaison de techniques

Un grand nombre de déterminations analytiques font appel à plusieurs techniques. Le couplage CG-SM en est un exemple: séparation suivie de détection.

Les méthodes globales de détermination des MO sont également divisées en deux parties: réaction et détection.

	Réaction	**Détection**
DCO	Oxydation à ébullition à reflux	Volumétrie par oxydo-réduction
COT	Combustion	} Absorption IR pour $C0_2$
	Oxydation chimique + UV	
DBO	Oxydation biochimique	Volumétrie de O_2
		ou électrode spécifique
		Manométrie

3.3. ANALYSES MICROBIOLOGIQUES

3.3.1. Bactériologie

Les matières fécales sont la principale source potentielle de bactéries pathogènes dans les eaux. Ces dernières ne sont émises que par une faible proportion de la population et représentent un pourcentage très modeste de la masse bactérienne apportée par les matières fécales. Afin de disposer d'une méthode simple et sensible, seuls les germes témoins de contamination fécale sont généralement recherchés: coliformes totaux, coliformes thermotolérants (appelés aussi fécaux), streptocoques fécaux, germes sporulés anaérobies sulfitoréducteurs.

Dans le cas d'un examen plus complet, on recherche plus particulièrement: Salmonella, Shighella, Legionnella, Giardia, Vibrio cholerae.

Dans les eaux résiduaires, les coliformes totaux, en priorité, mais aussi les coliformes thermotolérants et les streptocoques fécaux sont dénombrés.

Dans les eaux de consommation, il est vivement recommandé de quantifier les bactéries mésophiles revivifiables à 20 et 37°C. Les fluctuations de ces populations sont un bon indice de la qualité de l'eau et de l'état du réseau (dépôts, zone de stagnation, carbone assimilable...).

Les méthodes de dénombrement utilisent des milieux de culture appropriés et des réactions métaboliques pour mettre en évidence les colonies recherchées. En cas de résultat positif sur les milieux spécifiques d'isolement, un test de confirmation est toujours nécessaire.

Un dénombrement rapide, même moins précis des colonies bactériennes, est un objectif à atteindre pour assurer une automatisation plus poussée des traitements de désinfection. Les principes des capteurs étudiés sont variés.

3.3.2. Virologie

La méthode la plus utilisée consiste à dénombrer les entérovirus.

Une concentration préliminaire est indispensable. Les techniques les plus employées sont la filtration ou l'ultrafiltration sur membrane, les méthodes d'ad-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sorption-élution sur différents supports (nitrate de cellulose, cartouche en microfibre de verre, poudre de verre), les méthodes de floculation organique.

La plupart des virus habituellement recherchés dans le milieu hydrique peuvent être isolés sur différents systèmes cellulaires. Les plus utilisés sont les cellules de lignée continue de rein de singe type BGM, (buffalo green monkey) ou des cellules néoplasiques humaines (cellules Hela). La probabilité d'isoler un virus augmente avec le nombre de systèmes cellulaires utilisés. Il est ainsi recommandé d'employer au moins deux systèmes différents.

Les prélèvements concentrés sont inoculés aux cultures in-vitro, et l'apparition d'un effet cyto-pathogène, révélé par observation microscopique, témoigne d'une multiplication virale et signe la présence de virus dans l'inoculum.

3.3.3. Algologie

Le dénombrement des algues peut se faire par examen en microscopie optique ou électronique. Les espèces sont différenciées par la nature des pigments qu'elles synthétisent, leur morphologie ou leur mode de reproduction (voir page 402).

Les échantillons sont généralement fixés par addition de formol (3 à 5 ml de solution à 40 % pour 100 ml d'échantillon). Si l'eau est pauvre en algues, il faut procéder à une concentration. Celle-ci peut être réalisée par centrifugation (5 000 $t.min^{-1}$) ou par sédimentation (1 semaine dans une éprouvette de 1l). Un comptage optique est ensuite effectué.

On peut également évaluer la charge globale en algues d'une eau par le dosage des pigments chlorophylliens, notamment les chlorophylles a, b et c.

3.4. SYNOPSIS DES ANALYSES

Le tableau 46 donne des renseignements généraux sur les techniques analytiques les plus utilisées des différents paramètres des EP, EI et ER. Le classement des paramètres suit celui de la législation européenne des eaux d'alimentation. L'utilisation du tableau s'accompagne des remarques suivantes

- "autres techniques" : techniques d'analyse différentes de celles préconisées par les normes AFNOR; elles peuvent inclure des normes ASTM,
- la chromatographie ionique (IC) et la spectrophotométrie de plasma à couplage inductif (ICP) ont des domaines d'utilisation très vastes et ne sont citées que pour leurs applications les plus adaptées.
- (*) Analyses utilisées aussi fréquemment sur ER.
- Colorimétrie: spectrophotométrie d'absorption visible.
- AA : spectrophotométrie d'absorption atomique.
- CG: chromatographie en phase gazeuse.
- HPLC : chromatographie liquide haute pression.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 46 - Synopsis des principales méthodes analytiques

PARAMÈTRES	NORMES AFNOR			NORMES ASTM	AUTRES TECHNIQUES
	Numéro Série NF T	Technique d'analyse	Limite de détection	Série D	
Paramètres organoleptiques					
(*) Couleur	90.034	Colorimétrie	2,5 mg.l^{-1} Co.Pt		Disque coloré. Mesure non applicable à certaines eaux résiduaires.
(*) Turbidité	90.053	Néphélométrie	0,1 NTU	1880-81	Disque de Secchi.
Odeur-saveur	90.035	Analyse sensorielle	Sans goût	1292-86	
Paramètres physico-chimiques					
(*) pH	90.006	Indicateur coloré		1293-84	
	90.008	Électrode spécifique			
(*)Potentiel d'oxydo-réduction - rH				1498-81	Électrode spécifique
(*) Conductivité ($mS.cm^{-1}$) ou résistivité	90.031	Conductimétrie		1125-82	
(*) Chlorures	90.014	Volumétrie (précipitations)	5 mg.l^{-1}	512-81	Coulométrie IC
(*) Sulfates	90.009	Gravimétrie (précipitation)		516-82	Néphélométrie IC
Silice	90.007	Colorimétrie	5 µg.l^{-1}	859-80	ICP
(*) Calcium	90.016	Complexométrie EDTA	200 µg.l^{-1}	511-84	ICP
	90.005	AA			Colorimétrie
(*) Magnésium	90.005	AA	50 µg.l^{-1}	511-84	ICP
(*) Sodium	90.019	Émission de flamme	10 µg.1^{-1}	1428-82	IC
	90.020	AA			
(*) Potassium	90.019	Émission de flamme	50 µg.l^{-1}	1428-82	
	90.020	AA			
(*) Aluminium				857-79	Colorimétrie AA ICP
Dureté totale	90.003	Complexométrie EDTA		1126-86	Colorimétrie
(") TAC - TA	90.036	Alcalimétrie		1067-82	
(*)Résidu sec	90.029	Gravimétrie (évaporation)		1888-78	Calcul par la conductivité
(*) Oxygène dissous	90.106	Volumétrie (oxydo-réduction) ou électrode spécifique		888-81	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

PARAMÈTRES	NORMES AFNOR .			NORMES ASTM	AUTRES TECHNIQUES
	Numéro Série NF T	Technique d'analyse	Limite de détection	Série D	
Anhydride carbonique libre	90.011	Acidimétrie		513-82	Calcul équil. calcocarbonique
Paramètres substances indésirables					
(*) MES	90.105	Filtration ou centri-fugation et gravimétrie	0,5 $mg.l^{-1}$	1888-78	
(*) Nitrates	90.012	Colorimétrie	1 $mg.l^{-1}$ $N0_3$	992-71	Électrode spécifique - IC Absorbante W
(*) Nitrites	90.013	Colorimétrie	5 $\mu g.l^{-1}$ $N0_2$ -		
Ammonium Ammonium	90.015	Colorimétrie ou alcalimétrie	5 $\mu g.l^{-1}$ NH_4^+	1426-79	Électrode spécifique
(*) NTK	90.110	Minéralisation et alcalimétrie	0,5 $mg.l^{-1}$ N	3590-84	
Oxydabilité KMn04	90.050	Oxydo-réduction à chaud	0,4 $mg.l^{-1}$ O_2		A froid 4 h.
(*) Carbone organique total	90.102	Oxydation Absorption IR	0,2 $mg.l^{-1}$	2579-85	
(*) H_2S				4658-87	Distillation-volumétrie Électr. spécif. Colorimétrie Potentiométrie
Substance extr. chloroforme (SEC)					Extraction Gravimétrie
(*) Hydrocarbures totaux (Indice CH_2)	90.114	Extraction et absorption IR	50 $\mu g.l^{-1}$		Fluorescence W
(*) Indice phénol	90.109	Colorimétrie	10 $\mu g.l^{-1}$ phénol	1783-80	CG (4)
Bore	90.041	Colorimétrie		3082-79	ICP
(*) Détergents anioniques	90.039	Extraction et colorimétrie	50 $\mu g.l^{-1}$ LAS	2330-82	AA
Haloformes					CG
Fer	90.017	Colorimétrie ou AA	10 $\mu g.l^{-1}$ 10 $\mu g.l^{-1}$	1068-84	ICP
Manganèse	90.024 90.112	Colorimétrie ou AA	20 $\mu g.l^{-1}$ 10 $\mu g.l^{-1}$	858-86	ICP

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

PARAMÈTRES	NORMES AFNOR			NORMES ASTM	AUTRES TECHNIQUES
	Numéro Série NF T	Technique d'analyse	Limite de détection	Série D	
(*) Cuivre	90.022	Colorimétrie ou	5 µg.l^{-1}	1688-84	ICP
	90.112	AA	1 µg.l^{-1}		Polarographie
(*) Zinc	90.112	AA	1 µg.1^{-1}	1691-84	ICP
					Polarographie
(*) Phosphore	90.023	Colorimétrie de l'orthophosphate et des phosphates hydrolysables	10 µg.l^{-1}	515-82	ICP
(*) Fluorures	90.004	Électrode spécifique	50 µg.l^{-1}	1179-80	Colorimétrie
Cobalt	90.112	AA	1 µg.l^{-1}		
Chlore résiduel	90.037	Colorimétrie ou	0,03 mg.l^{-1}	1253-86	Ampérométrie
	90.038	oxydo-réduction			Volumétrie
Ozone résiduel					Colorimétrie
ClO_2 résiduel					Ampérométrie
					Volumétrie
Baryum	90.118	AA	5 µg.l^{-1}	4382-84	ICP
Argent	90.112	AA	5 µg.l^{-1}	3866-82	
Paramètres substances toxiques					
Arsenic	90.026	Colorimétrie	1 µg.l^{-1}	2972-84	AA
Bérylium				3645-84	
Cadmium	90.112	AA	0,1 µg.l^{-1}	3557-84	
(*) Cyanures	90.107	Colorimétrie	10 µg.l^{-1}	2036-82	Ionométrie
	90.108				
(*) Chrome	90.112	AA	1 µg.l^{-1}	1687-86	Colorimétrie
					ICP (Cr VI)
Mercure	90.113	AA	0,03 µg.1^{-1}	3223-86	
	90.131				
(*) Nickel	90.112	AA	1 µg.l^{-1}	1886-84	ICP
(*) Plomb	90.112	AA ou	1 µg.l^{-1}	3559-85	Polarographie
	90.028	colorimétrie			ICP
Antimoine				3697-83	AA
Sélénium	90.025	Colorimétrie	5 µg.l^{-1}	3859-84	AA
Vanadium				3373-84	ICP
Pesticides	90.120	CG	10 ng.l^{-1}	3086-85	
				3478-83	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

PARAMÈTRES	NORMES AFNOR			NORMES ASTM	AUTRES TECHNIQUES
	Numéro Série NF T	Technique d'analyse	Limite de détection	série D	
PCB				3534-85	CG
HPA	90.115	HPLC		4657-87	
Paramètres microbiologiques					
(*) Coliformes totaux	90.413 90.414	Ensemencement en milieu liquide ou filtration sur membrane			
(*) Coliformes thermotolérants	90.413 90.414	Ensemencement en milieu liquide ou filtration sur membrane		3508-76	
(*) Streptocoques fécaux	90.416	Filtration sur membrane			
Clostridium sulfito-réducteurs	90.415 90.417	Incorporation en gélose ou filtration sur membrane			
Dénombrement des germes totaux	90.401 90.402	Incorporation sur gélose - Incubation à37et20°C		F488-79 4455-85	Épifluorescence
Chlorophylle	90.116 90.117	HPLC Colorimétrie		3731	
(*) Paramètres spécifiques ER					
DCO	90.101	Volumétrie (oxydo-réduction)	30 $mg.l^{-1}$ O_2	1252-83	
DBO	90.103	Volumétrie (oxydo-réduction) Électrode spécifique	3 $mg.l^{-1}$ O_2		Électrode spécifique
Inhibition de daphnia	90.301	Test de mobilité			
Hydrocarbures totaux (effluents de raffineries)	90.202 90.203	Floculation-filtration Extraction-gravimétrie Extraction et absorption IR		4281-83 3921-85 3328-78	Chromatographie fluorescente
Phénols entraînables à la vapeur	90.204	Extraction et colorimétrie			

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. EXAMEN DES EAUX DE CONSOMMATION ET FABRICATION

Pour concevoir une station de traitement d'eau, la connaissance, même approfondie, de l'analyse physico-chimique est nécessaire mais insuffisante. En fonction de l'utilisation finale (eau potable ou eau de fabrication) il est souvent indispensable de pratiquer certains essais pour choisir le procédé et évaluer son efficacité. Ces essais doivent être effectués sur place ou très peu de temps après le prélèvement de l'échantillon.

4.1. ESSAIS DE TRAITABILITÉ

4.1.1. Étude de la décantation naturelle et du débourbage

Dans le cas d'eaux fortement chargées en MES (supérieures à 2 $g.l^{-1}$) il est souvent nécessaire de mettre en oeuvre une étape préliminaire de dégrossissage. Des tests déterminent la vitesse de passage, l'ajout éventuel de réactifs, le volume des boues à extraire et leur concentration.

On procède avec le floculateur de laboratoire comme pour une étude de coagulation-floculation (voir ci-dessous), avec ou sans ajout de réactifs minéraux ou organiques. La décantation en éprouvette est suivie en fonction du temps (MES de l'eau décantée et pourcentage des boues).

4.1.2. Étude de la coagulation et floculation des eaux

Cette étude a pour but de rechercher la nature et les doses de réactifs qui permettent de traiter une eau dans les meilleures conditions

- coagulants et floculants,
- ajustement du pH,
- adsorbant.

Il est souvent utile d'ajouter aussi des oxydants (chlore, ozone, dioxyde de chlore). La dose d'électrolyte nécessaire peut se déterminer, soit par électrophorèse, soit par des essais de floculation.

4.1.2.1. Électrophorèse

Cette technique consiste à observer le déplacement des colloïdes placés dans un champ électrique. L'appareil utilisé pour cette détermination (Zétamètre) comprend un boitier de contrôle, une cellule électrophorétique, un dispositif d'éclairage, un microscope binoculaire qui permet l'examen de particules dont les dimensions sont voisines du micron. La mesure de la vitesse de déplacement des colloïdes est manuelle ou automatique. Les déterminations sont effectuées d'abord sur l'eau brute, puis avec des doses croissantes de coagulant. Le potentiel Zêta des particules colloïdales peut être calculé à partir de la vitesse et de la température (voir page 133).

Ceci permet de tracer une courbe représentant l'évolution du potentiel (exprimé en millivolts) en fonction de la dose d'électrolyte (figure 165). Dans le cas d'une eau correspondant à la courbe 1(turbidité essentiellement colloïdale) il suffit d'adopter la dose A de réactif permettant d'atteindre un potentiel de - 3 à - 4 millivolts. Par

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

contre, pour une eau correspondant à la courbe 2 avec forte présence d'algues ou de MO il est nécessaire d'adopter une dose B annulant le potentiel Zêta.

Le transport de l'eau du lieu de prélèvement au laboratoire affecte peu le résultat de l'étude électrophorétique.

4.1.2.2. Essais de floculation

En plus de la détermination de la dose de coagulant, ces essais permettent de visualiser la floculation et de connaître ses effets aussi bien sur l'eau décantée que sur les boues. Ils doivent être effectués à une température voisine de celle

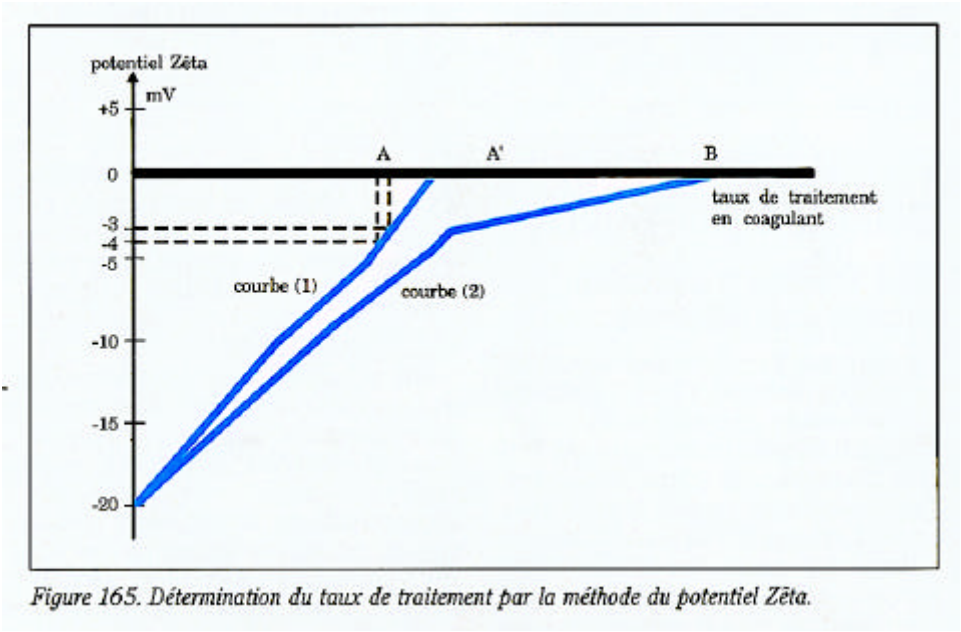
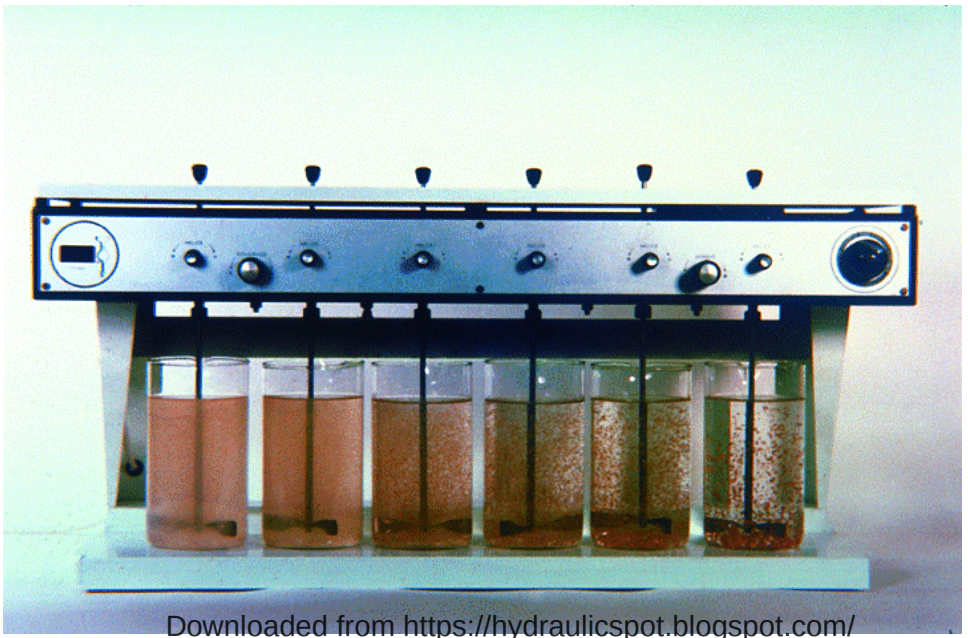


Figure 165. Détermination du taux de traitement par la méthode du potentiel Zêta.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Floculateur à commande électrique, variateur de vitesses et minuterie.

que possédera effectivement l'eau au cours de son traitement industriel.

En premier lieu, on expérimente un seul réactif à des doses différentes; si le résultat n'est pas suffisant, on recommence un nouveau test en répétant le traitement qui a donné le meilleur résultat dans le premier essai et en expérimentant un autre traitement en parallèle. Dans le cas de l'utilisation de plusieurs réactifs, il importe de prendre en compte l'ordre et la séquence de leur introduction.

Un floculateur permettant d'agiter simultanément, à une vitesse bien déterminée, le liquide contenu dans une série de béchers doit être utilisé pour que les résultats soient comparables. Il faut en effet que la vitesse de rotation soit identique dans tous les béchers ; la valeur optimale est voisine de 40 tours par minute pour une pale de 1 x 5 cm tournant dans un bécher de 1 litre.

Cet essai est effectué pendant 20 minutes. Noter les renseignements suivants

- **Dose de réactifs et séquence**
- **Aspect de la floculation exprimé par une note**

0 : pas de flot,
2 : flot à peine visible, petits points,
4 : petit flot,
6 : flot de dimension moyenne,
8 : bon flot,
10 : très gros flot.

- **pH après floculation**. Pour les meilleurs résultats obtenus, on complète ces indications par les renseignements suivants

- couleur et turbidité de l'eau décantée,
- pourcentage de boue après décantation,
- vitesse de sédimentation diffuse,
- coefficient de cohésion de la boue ou vitesse de décantation de la boue,
- oxydabilité au permanganate de l'eau décantée,
- mesures particulières au traitement étudié : Fe, Mn, COT, polluants spécifiques...

4.1.2.3. Examen de la sédimentation

L'étude électrophorétique et l'essai de floculation ne suffisent pas pour transposer les résultats à une échelle industrielle, la question primordiale étant de savoir à quelle vitesse il est possible de faire fonctionner un décanteur. Il y a donc lieu de procéder en outre à un examen de la sédimentation.

Deux cas peuvent se présenter

- **floculation relativement peu abondante:** si on laisse au repos l'eau floculée, chacune des particules se dépose comme si elle était seule, certaines à grande vitesse, d'autres à vitesse plus faible. Le liquide se clarifie graduellement, un dépôt se forme au fond du bécher, c'est ce que l'on appelle une sédimentation

libre ou diffuse,

- **floculation abondante:** la sédimentation se produit sur l'ensemble des particules floculées laissant apparaître à la partie supérieure du bécher un liquide clair au-dessus d'une couche boueuse, c'est ce que l'on appelle la sédimentation freinée ou en piston qui, pratiquement, ne se produit que lorsque l'on traite des liquides très riches en matières floculables.

Les mesures à effectuer sont différentes dans l'un et l'autre cas.

- **Mesure de la cohésion de la boue**

Si on ajoute à l'eau une quantité croissante de boue provenant d'un essai précédent, on s'aperçoit que la vitesse de sédimentation augmente. Ceci se produit jusqu'à ce que l'on ait chargé le liquide d'une quantité suffisante de boue pour obtenir une sédimentation en piston. Cette observation est à la base de l'emploi industriel des décanteurs à "contact de boue".

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

On constate qu'une couche boueuse soumise à un courant d'eau ascensionnel se dilate et occupe un volume apparent à peu près proportionnel à la vitesse de l'eau, selon une relation qui caractérise la cohésion de la boue. On utilise une éprouvette de 250 ml dans laquelle on introduit la boue récoltée dans différents béchers au cours de l'essai de floculation, chaque bécher ayant reçu les mêmes doses de réactifs. On laisse au repos 10 minutes. Puis on siphonne l'excès de boue introduite de façon à ne laisser dans l'éprouvette qu'un volume apparent d'environ 50 ml.

On introduit alors dans l'éprouvette un petit entonnoir prolongé d'un tube dont l'extrémité se trouve à environ 10 mm du fond de l'éprouvette. Puis, par cet entonnoir qui doit s'enfoncer légèrement dans l'éprouvette, à la partie supérieure de celle-ci, afin d'éviter l'entraînement des bulles d'air, on fait pénétrer de l'eau qui doit être obligatoirement l'eau décantée au cours de l'essai de floculation pour n'y introduire **aucune variation, ni de pH, ni de température.** Il est nécessaire d'introduire cette eau d'une manière discontinue par petites quantités, l'excédent de liquide s'écoulant par débordement de la partie supérieure de l'éprouvette.

Ceci a pour effet de mettre la boue en expansion et l'on détermine les vitesses ascensionnelles de l'eau qui correspondent à différents états d'expansion de la boue.

On mesure le temps T (en secondes) correspondant à l'introduction de 100 ml d'eau pour des volumes apparents V ml de la boue égaux à 100-125-150-175-200m1.

Pour calculer la vitesse v, si A est la hauteur en millimètres de léprouvette qui correspond à 100 ml (distance entre

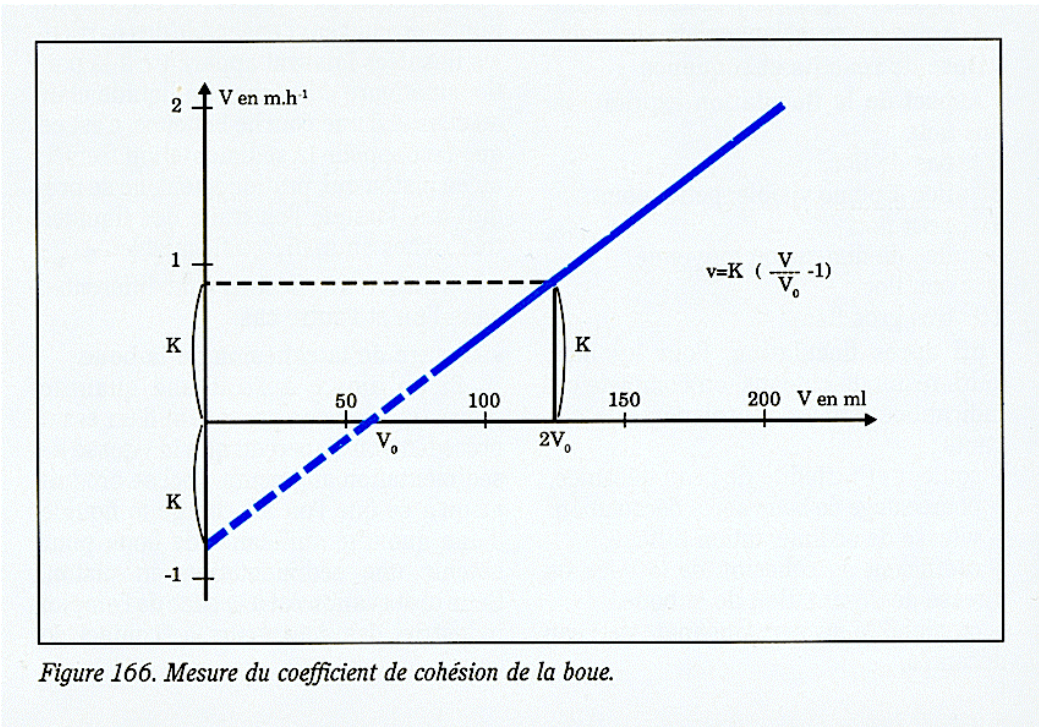


Figure 166. Mesure du coefficient de cohésion de la boue.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

les traits 100 et 200 ml sur l'éprouvette de 250 ml), v est égale à 3,6 A/T $m.h^{-1}$

On représente graphiquement les résultats en portant v en ordonnée et V en abscisse (figure 166).

On constate que la courbe représentative des variations de la vitesse en fonction du volume de la boue en expansion est une droite

$$v = K\left(\frac{V}{V_0} - 1\right)$$

v : vitesse ascensionnelle dans (éprouvette nécessaire pour obtenir le volume V,

V : volume apparent de la boue en expansion,

V_0.: volume de la boue tassée correspondant à une vitesse nulle et mesurée sur le graphique.

Le **coefficient "K"** est la caractéristique de la cohésion de la boue; on l'appelle coefficient de cohésion **de boue.** Il dépend de la température qu'il faut donc noter soigneusement.

Pour une boue bien constituée de décantation rapide, la valeur du coefficient **K** peut atteindre 0,8 à 1,2.

Au contraire, pour une boue constituée d'un floculat fragile, léger et riche en eau, la valeur du coefficient K peut ne pas excéder 0,3. La mesure de ce coefficient constitue donc un renseignement très précieux pour connaître la façon dont les précipités se comportent dans un décanteur à "contact de boue" et pour déterminer (influence d'un adjuvant de floculation.

Il n'existe, a priori, pas de relation entre la grosseur d'un floc et sa cohésion.

- **Mesure de la vitesse de décantation** en piston

Lorsque l'essai de floculation produit directement une sédimentation "en piston", il est naturellement inutile et même nuisible d'enrichir le liquide avec de la boue, et par conséquent, il n'y a pas lieu d'envisager l'utilisation d'un décanteur à "contact de boue".

On cherche à mesurer directement la vitesse de contraction de la masse boueuse telle qu'elle résulte de l'essai de floculation et telle qu'elle se produira d'une façon naturelle dans un décanteur à l'échelle industrielle.

On procède de la même façon que pour la mesure du coefficient K, mais on travaille à une concentration égale à celle de la boue obtenue en floculant 1 litre d'eau sous examen.

On remplit de liquide floculé l'éprouvette de 250 ml; on laisse tasser la boue 5 à 10 minutes afin que le floc se reforme, puis par l'entonnoir, on introduit d'une façon discontinue de l'eau de manière à mettre progressivement la boue en expansion jusqu'à lui rendre son volume apparent initial de 2 5 0 ml.

La vitesse trouvée indique la vitesse ascensionnelle qu'il serait théoriquement possible d'admettre dans un décanteur industriel. Elle correspond à la vitesse de la partie linéaire de la courbe de Kynch (voir page 162).

Il est bon, à la suite de cette opération, de laisser la boue se tasser spontanément dans (éprouvette en notant les volumes apparents rapportés au volume initial occupé par la couche de boue en fonction du temps (de 0 à 2 h). Ceci permet de connaître les volumes de boue qu'il y a lieu d'extraire et, par conséquent, de calculer certains organes du décanteur tels que les fosses collectrices de boue, les pales de raclage, etc.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La figure 167 résume les opérations

- hauteur de l'éprouvette correspondant à 100 ml …….. A mm
- volume d'eau introduit en 1 minute pour maintenir la couche supérieure de boue au niveau du liquide placé dans l'éprouvette (250 ml)…….B ml
- vitesse théorique de sédimentation en mètres ……..VS $m.h^{-1}$

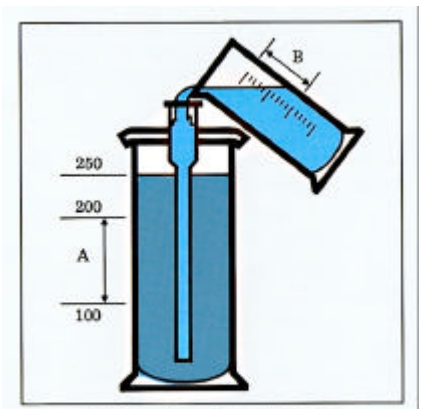


Figure 167. La vitesse V, est égale à $\frac{0,6\ AB}{1000}\ m.h^{-1}$.

4.1.2.4. Essai de flottation

A l'aide d'un ballon d'eau pressurisée, des volumes croissants d'eau pressurisée sont introduits dans différents béchers où l'on a effectué, au préalable, la floculation optimale de l'eau à traiter. On note les caractéristiques suivantes

- % eau pressurisée,
- vitesse de montée des bulles,
- -vitesse de montée du flot,
- aspect du flot,
- épaisseur du gâteau,
- mesures dans l'eau flottée: turbidité, couleur, MO...,
- résistance et aptitude de la boue au raclage.

4.1.3. Essai de décarbonatation à la chaux

En principe, le coagulant est le chlorure ferrique, mais on peut essayer aussi le sulfate d'aluminium avec ou sans adjuvant. Dans ce cas, on dose l'aluminium après filtration sur papier (l'aluminium est nettement soluble en milieu alcalin).

On fait un premier essai sans coagulant pour déterminer la dose de chaux en introduisant en même temps 10 g par litre de $CaCO_3$ en poudre (50 gym). Agiter 5 minutes, décanter et filtrer sur papier à filtration lente. Titrez l'eau filtrée :

	Dose de chaux en $mg.l^{-1}$				
	100	125	->	350	375
TA					
TAC					
TH					
TCa					

Ensuite, avec la dose de chaux qui a donné, soit un TA supérieur de 0, 5 °F à la moitié du TAC, soit un TH minimal, on fait un nouvel essai de floculation mais avec des doses croissantes de coagulant.

Dans le cas de désiliciage, un autre réactif (magnésie) peut être mis en oeuvre, et le dosage de la silice est pratiqué sur l'eau filtrée. Dans le cas d'adoucissement, le carbonate de sodium doit être utilisé.

4.1.4. Détermination des demandes en oxydants

4.1.4.1. Test d'absorption de chlore

On utilise une série de flacons ayant tous la même capacité et constitués d'un verre de même composition.

Introduire le même volume d'eau à examiner dans chacun des flacons et une certaine dose de chlore, cette dernière allant en croissant du premier flacon au dernier flacon. Après un temps de contact corres-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

pondant en général à la durée de séjour de l'eau dans l'installation, à température constante et à l'abri de la lumière, on mesure le chlore restant dans l'eau de chaque flacon (pour certaines études, il y a intérêt à effectuer cette recherche à différents temps de contact: 1, 2, 5...24 heures).

On établit ainsi la courbe représentative du chlore résiduel en fonction du chlore introduit (voir chap. 3, figure 95).

Il est toujours recommandé d'analyser le chlore total et le chlore libre, surtout si la courbe d'absorption ne présente pas de point critique afin de déterminer la demande en chlore, en fonction d'un résiduel choisi pour un certain temps de contact Par ailleurs, certaines mesures spécifiques peuvent être effectuées en fonction de doses croissantes de chlore: formation d'haloformes, couleur, matières organiques, influence sur la floculation, seuils de dégustation.

- **Méthode rapide de détermination du point critique**

Elle est utilisée en faisant une seule mesure, en introduisant dans l'eau brute une dose de chlore largement excédentaire (A sur la figure 95 de la page 220) ; après contact, la mesure du chlore résiduel (Aa) permet de déterminer approximativement la valeur du break point

Om=OA-Aa

- **Test de conduite - Courbe de cinétique d'absorption de chlore**

Pour un taux de chlore choisi, on mesure les concentrations de chlore libre et total en fonction du temps. (Voir page 222 - figure 96). Les parties de courbe à examiner, le plus particulièrement, correspondent à la "demande immédiate (moins d'une heure) et aux consommations après un long temps de contact (réseaux longs). Ce test peut donner des indications sur l'utilité des chlorations en différents points du réseau.

4.1.4.2. Test d'absorption de dioxyde de chlore

Pour connaître la demande en dioxy de de chlore d'une eau, on pratique de la même façon que pour la demande en chlore: on construit la courbe du résiduel du désinfectant en fonction des doses introduites. En présence d'ammoniaque, la courbe ne présente pas de point critique, (le dioxyde ne réagissant pas avec l'ion ammonium). Une solution concentrée

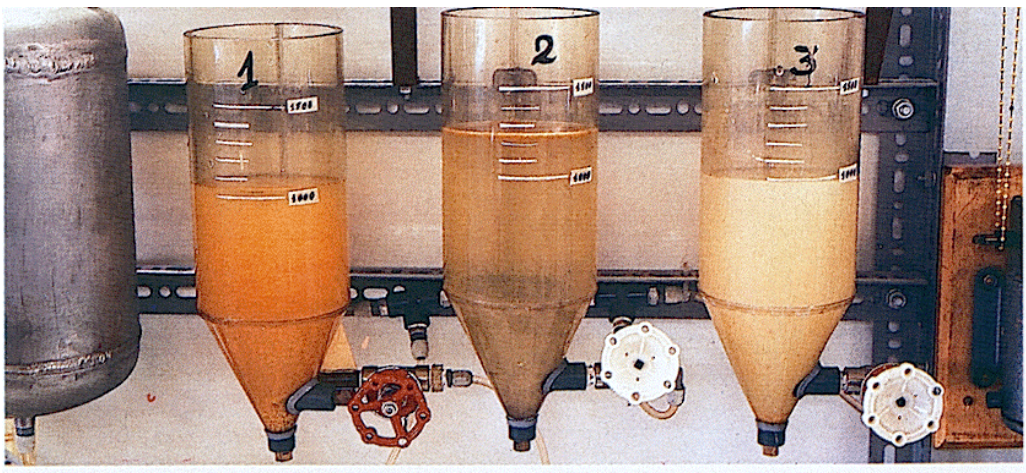


Figure 168. Flottatest de laboratoire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de dioxyde de chlore est préparée à partir de chlorite de sodium en présence d'un excès d'acide chlorhydrique.

La concentration de la solution mère est d'environ 15 $g.l^{-1}$ $C1O_2$. La solution fille est généralement préparée à 0,5 $g.l^{-1}$. Cette concentration doit être vérifiée ainsi que l'absence ou la présence de chlorite.

4.1.4.3. Test d'absorption d'ozone

En laboratoire ou sur site la demande en ozone d'une eau est déterminée en utilisant un flacon spécial (figure 169).

On injecte l'air ozoné en A à l'aide d'une seringue volumée. L'ouverture du robinet B permet le déplacement d'un volume d'eau identique au volume d'air ozone. Après la fermeture du robinet B, le flacon

est agité manuellement durant un temps qui correspond au temps de contact de

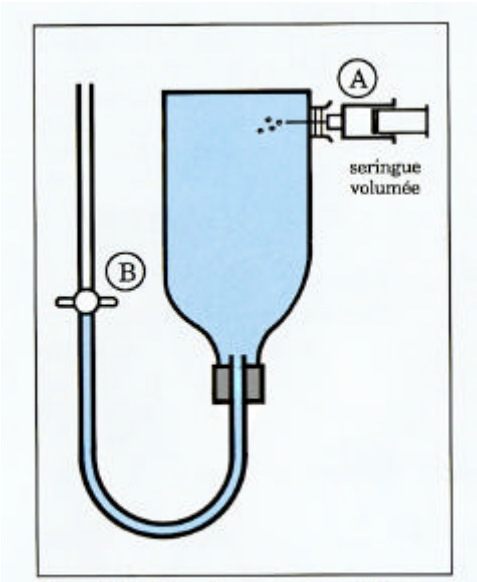


Figure 169. Demande en ozone : matériel expérimental.

l'eau dans la tour d'ozonation. L'ozone résiduel est dosé par titrimétrie à la diéthylphénylène diamine (DPD) après un ajout d'iodure de potassium.

Le taux d'ozone introduit est donné par la formule suivante

$$\text{Taux d'ozone mg. } l^{-1} = \frac{C_{O3} \cdot V}{V - v}$$

avec:

C_{O3} : concentration de l'ozone dans l'air en $mg.l^{-1}$

V : volume du flacon (1), v : volume d'air ozoné (1).

On porte sur un plan en fonction des différents taux d'ozone introduits, les concentrations d'ozone résiduel correspondantes. On obtient en général (cf. figure n° 170) une droite dont les points importants sont les suivants

Le point A intersection de la droite prolongée avec l'axe des abscisses représente le taux d'ozone qu'il faut introduire pour satisfaire la demande chimique de l'eau en ozone et voir apparaître un résiduel d'ozone.

Le point B de la droite correspond au taux d'ozone qu'il faut introduire pour satisfaire la demande en ozone et obtenir après le temps de contact choisi un résiduel de 0,4 $mg.l^{-1}$.

4.1.5. Essai de dégazage-aération

Il est parfois utile de chasser le CO_2 libre par ruissellement au contact de l'air. Pour se rendre compte de l'efficacité de l'opération, procéder comme suit

- utiliser deux béchers de 11. Transvaser l'eau de l'un dans l'autre, en faisant chuter l'eau de 20 cm et avec un débit d'environ 1l en 10s,
- doser le CO_2 libre et noter le pH en fonction du nombre de chutes et jusqu'à ce que le pH ne varie pratiquement plus.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

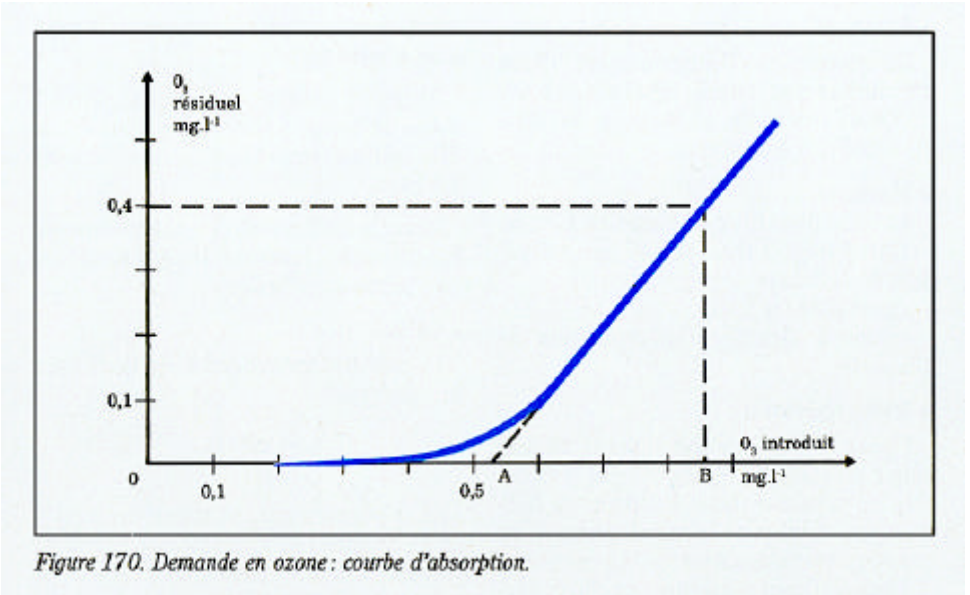


Figure 170. Demande en ozone : courbe d'absorption.

4.1.6. Essai de déferrisation physico-chimique

La déferrisation par oxydation à l'air n'est pas toujours possible, en particulier pour les eaux riches en M0. Pour s'en rendre compte, il faut procéder à un test. Celui-ci doit être effectué sur place, immédiatement après le prélèvement des échantillons:

- aérer rapidement en transvasant 20 fois l'eau d'un bécher dans un autre,
- filtrer sur papier Durieux, bande bleue on sur membrane 0,45 µm,
- contrôler la dose de fer résiduel, l'évolution du pH, de l'oxygène dissous et du gaz carbonique.

Si la dose de fer résiduel n'est pas inférieure à 0,1 mg.l^{-1}, il faut effectuer des essais plus complets, si possible sur installation pilote, en mettant en oeuvre d'autres oxydants et/ou divers coagulants et floculants (alginates par exemple).

4.2. MESURE DE PARAMÈTRES GLOBAUX

Il existe dans le domaine du traitement des eaux des indices globaux caractéristiques de l'eau ou de la marche d'une installation ou encore servant aux choix des procédés. Trois d'entre eux sont décrits ci-après.

4.2.1. Indice de colmatage FI (Fouling Index)

Lorsque le critère de turbidité n'est plus assez sensible, la présence de particules peut être appréciée à partir du colmatage d'un filtre (figure 171). La mesure intéresse les procédés de filtration par membrane.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

.

- **Principe**

On détermine l'encrassement d'une membrane d'acétate de cellulose de porosité 0,45 µm après 15 minutes de filtration de l'eau à analyser.

- **Matériel**

- support pour filtre de diamètre 47 mm,
- filtre 0,45 µm, diamètre 47 mm, en acétate de cellulose,
- manomètre 0,5 bar,
- vanne à aiguille pour régulation de pression.

- **Mode opératoire**

Placer le filtre sur son support, l'humi difier et ajuster le joint torique. Purger l'air du circuit et fixer le support de telle sorte que le plan de la membrane soit en position verticale. Ajuster la pression à 2,1 bars (30 psi) et mesurer au chronomètre le temps t_0 nécessaire pour filtrer 500ml d'eau (ce temps doit être supérieur à 10 secondes). Recommencer si la pression varie de ± 5 % pendant la mesure. Laisser le filtre en place et en fonctionnement, en réajustant régulièrement la pression si nécessaire.

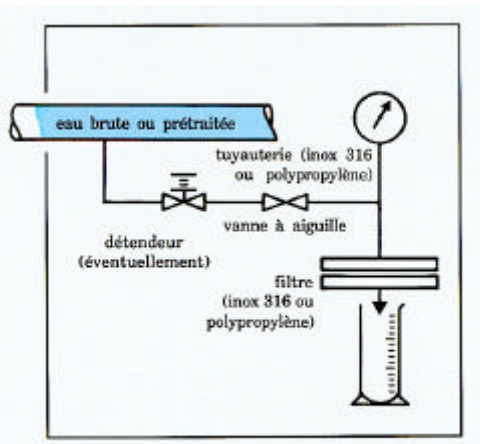


Figure 171. Principe du dispositif de mesure du FI.

Après 15 minutes, mesurer au chronomètre le temps t nécessaire pour filtrer 500 ml en contrôlant la pression de 2,1 bars.

Isoler le filtre et retirer la membrane qui est conservée en vue d'analyses complémentaires éventuelles.

- **Calcul**

Le pouvoir encrassant P est donné par la relation

$$P\% = 100\left(1 - \frac{t_o}{t}\right)$$

Si ce pourcentage est supérieur à 80 % en 15 minutes, il est nécessaire de recommencer le même essai pour 10, 5 ou même 3 minutes.

L'indice de colmatage est calculé à partir de P % et du temps T en minutes entre les deux mesures

$$FI = \frac{P\%}{T}$$

Exemple: à 2,1

bars t_0 = 2 8 secondes,

t = 44 secondes (après 15 mn, soit T=15).

$$P\% = 100\left(1 - \frac{28}{44}\right) = 36{,}4\,\%$$

$$FI_{15} = \frac{36{,}4}{15} = 2{,}4$$

4.2.2. Comptage de particules

Le comptage de particules est un critère de plus en plus employé (eau de réinjection, eau ultrapure, filtration sur membranes et cartouches...).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les appareils sont de plus en plus performants: comptage, courbe granulométrique, gammes de mesure. Toutefois, la mesure reste délicate: transport de l'échantillon, choix des plages de mesure, dilutions éventuelles. Quelques appareillages proposés dans le domaine des eaux sont le plus souvent basés sur des principes optiques de diffusion, absorption, diffraction (lumière ou laser).

4.2.3. Essai marbre

Pour connaître l'agressivité ou le pouvoir incrustant d'une eau, un test chimique peut être pratiqué en dehors du calcul de l'équilibre calco-carbonique (voir page 262).

Remplir un flacon de 12 5 ml de l'échantillon d'eau, additionnée de 1 à 2 grammes de marbre finement broyé et préalablement lavé plusieurs fois à l'eau distillée, puis à l'eau sous analyse. Le flacon doit être parfaitement rempli sans bulle d'air.

Agiter lentement pendant 24 heures et mesurer le pH, le TAC et le TH après filtration.

La comparaison de ces valeurs avec le pH, le TAC et le TH de l'eau avant contact avec le marbre, permet d'en déterminer le caractère agressif ou entartrant.

4.3. CAS DES EAUX TRÈS PEU MINÉRALISÉES

Sur les condensats de centrales nucléaires et surtout sur les eaux ultrapures, les garanties demandées concernent tous domaines: minéral, organique, particulaire, bactériologique... Les appareillages doivent être de plus en plus performants

Pratiquement seules les analyses en continu présentent une signification réelle

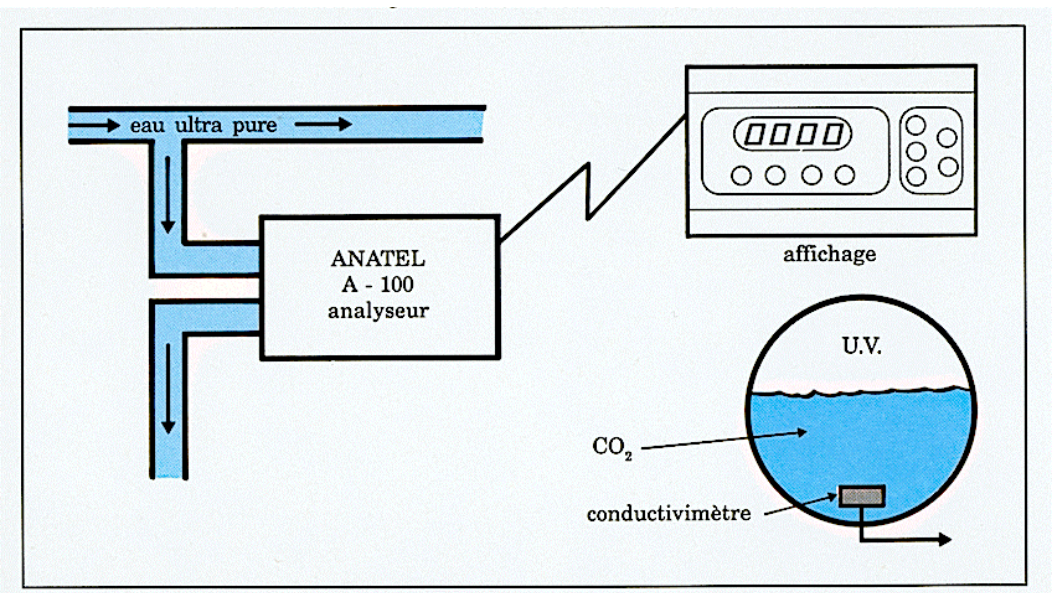


Figure 172. Principe de fonctionnement du COTmètre pour eau ultrapure.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tout transport est néfaste. Les principaux paramètres à prendre en compte sont les suivants :

- **Résistivité**

Cette mesure doit être effectuée dans une cellule à circulation capable de détecter 25 Mohms.cm

- **Sels et métaux**

Les seuils de concentrations recherchés peuvent se situer en -dessous du $\mu g.l^{-1}$,entre autres pour le sodium et les métaux lourds. Certaines électrodes spécifiques et la chromatographie ionique, à colonne de suppression de l'éluant" avec préconcentration, peuvent répondre à ces exigences.

- **COT**

Les appareilles mesurant un abaissement de la résistivité, après minéralisation de la matière organique, sont les mieux adaptés (seuil de détection annoncé de $20\mu g.l^{-1}$).

- **Comptage de particules**

Si le circuit de prise d'échantillon est très court, les résultats des mesures effectuées sur place et sans dilution sont corrects et reproductifs.

- **Indices de colmatage**

Ils sont très faibles. les résultats n'ont une signification que si les mesures sont effectuées par un automate en continu.

- **Bactériologie**

L'analyse par prélèvements ponctuels donne des résultats représentatifs. La technique de filtration sur membrane est appropriée, car elle permet de filtrer des volumes largement superieurs à ceux demandés pour l'examen de la potabilité.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. EXAMEN DES EAUX RÉSIDUAIRES

5.1 ANALYSES SPÉCIFIQUES

5.1.1. DBO

La demande biochimique en oxygène est normalement mesurée au bout de cinq jours. C'est la DBO_5 ; elle correspond aux phases d'assimilation et de synthèse. Il peut être utile de connaître la DBO ultime, au bout d'une vingtaine de jours, incluant la phase d'auto-oxydation (métabolisme endogène).

- **Méthode par dilution** (NF T 90.103)

On prépare des dilutions convenables de l'eau à examiner avec une eau pure ensemencée, dont on vérifie de temps à autre qu'elle n'absorbe pas elle-même des quantités appréciables d'oxygène. L'ensemencement ne sera pas nécessaire en présence d'eau résiduaire urbaine. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la perte d'oxygène au cours de l'essai est située entre 35 et 60 % de la teneur initiale. Les dilutions utilisées sont fonction de la pollution. Pour les déterminer, on peut se servir de la mesure de la DCO en sachant que la $DB0_5$ est généralement inférieure à la DCO et que le rapport DCO/ $DB0_5$ est le plus souvent compris entre 1,5 et 3. En admettant qu'une eau stabilisée à 20 °C contient environ 8 mg.l-1 d'oxygène, on peut écrire :

$$\text{facteur de dilution} = \frac{DBO_5 \text{ présumée}}{4}$$

On prépare au moins trois dilutions différentes de manière à bien encadrer la valeur présumée. Les dilutions sont maintenues à l'obscurité pendant cinq jours à 20 °C. L'eau de dilution employée doit rester à cette température et être en parfait équilibre avec l'atmosphère, ce qui s'obtient facilement en conservant la réserve d'eau pure destinée aux dosages dans l'étuve réglée ou dans le bain thermostaté utilisé pour l'incubation des échantillons dilués.

Pour éviter les interférences positives sur le résultat en cas de nitrification, les organismes nitrificateurs doivent être éliminés par acidification de l'échantillon. L'eau de dilution doit être ensemencée avant de reprendre le mode opératoire.

Il est bien évident que, la mesure de la $DB0_5$ étant une mesure à caractère biologique, on doit être assuré de la présence de micro-organismes capables de dégrader la matière polluante. On peut préparer un ensemencement microbien à partir d'un terreau sur lequel on a laissé percoler l'eau étudiée, ou encore à partir de boues prises en aval du rejet en bordure de rivière.

- **Méthodes manométriques**

Des appareils basés sur des méthodes manométriques permettent de suivre l'évolution, en récipient fermé et en fonction du temps, de la disparition d'oxygène dans l'atmosphère du récipient

Pour décider du choix d'un procédé de traitement, il est souvent intéressant de connaître

- la $DB0_5$ totale mesurée sur l'échantillon d'eau brute,
- la DBO_5 dissoute après filtration sur membrane,
- la DBO_5 après décantation (AD) qui englobe la DBO colloïdale et dissoute; il est fréquent en France d'effectuer cette décantation en deux heures.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'incertitude dans la détermination de la $DB0_5$ peut être importante, en particulier sur certaines ERI brutes si l'ensemencement n'est pas adapté. Sur des ERU brutes, l'imprécision ne dépasse pas 10 à 15 %, par contre sur des ERU après épuration biologique poussée, elle peut atteindre jusqu'à 50 %.

5.1.2. Demande chimique en oxygène

La méthode normalisée (NF T 90.101), pour les eaux usées, utilise le dichromate de potassium en milieu sulfurique à chaud, oxydant puissant dont la consommation permet de définir la DCO. La précision de la mesure est de l'ordre de 10 % pour des valeurs se situant au-dessus de 50 $mg.l^{-1}$ d'O_2. D'autres méthodes sont adaptées à des DCO plus faibles.

La DCO représente tout ce qui peut être oxydé, en particulier certains sels minéraux oxydables (sulfures, sulfites...), et la majeure partie des composés organiques. Seuls certains composés azotés et hydrocarbures échappent à cette puissante oxydation.

La représentativité de la DCO n'est plus satisfaisante pour des teneurs en chlorures supérieures à 2 $g.l^{-1}$.

L'oxydabilité au permanganate de potassium à froid (4 heures) ou à chaud (10 min d'ébullition) peut aussi constituer une bonne méthode de terrain pour suivre l'évolution des eaux sur une station d'épuration (surtout eaux épurées).

La mesure du **COT** est actuellement de plus en plus utilisée (voir page 340), l'oxydation de la matière organique est généralement plus complète que lors de la mesure de la DCO.

Il est souvent intéressant de mesurer les trois critères COT, DCO et $DB0_5$ et de connaître les rapports DCO/COT et DCO/DBO_5 qui peuvent être indicateurs de pollutions particulières (effluents industriels).

5.1.3. MES

Les méthodes de filtration sur membranes paraissent simples mais les normes doivent être respectées scrupuleusement. Les protocoles opératoires doivent être toujours les mêmes pour que les résultats soient comparables. Les sources d'erreurs sont nombreuses: type de membrane, valeur de la pression, du vide ou de l'accélération (méthode par centrifugation), volume des prises d'essai, mode de lavage après séparation et surtout post précipitation entre prélèvement et analyse (hydroxydes, carbonates, phosphates, gypse...).

5.1.4. Volume des matières décantables

L'analyse est faite sur des échantillons passés à travers un tamis de 5 mm pour enlever les gros débris. On appelle matières décantables celles qui se déposent dans un liquide au repos pendant un temps conventionnellement fixé à deux heures. Les éprouvettes généralement utilisées sont graduées et de forme conique ou cylindro-conique, ce qui permet d'apprécier un volume décanté. Cette mesure n'est représentative que sur des eaux relativement chargées.

5.1.5. Hydrocarbures

Les méthodes analytiques pour déterminer globalement les hydrocarbures sont fort nombreuses et leurs résultats peuvent être très différents. Les paramètres qui interviennent sont multiples: solvant, conditions d'extraction, gravimétrie ou absorption IR, calculs des absorbances

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

IR (mode d'étalonnage, longueurs d'ondes utilisées). Les méthodes appliquées doivent toujours être spécifiées et les modes opératoires scrupuleusement respectés. Ainsi les résultats suivant les normes NF T 90.114, 90.202 et 90.203 peuvent être fort éloignés.

Les huiles et graisses présentes dans les ERU ou les effluents d'industries alimentaires sont généralement mesurées par les méthodes décrites en 6.4.

5.1.6. Azote

Pour suivre (évolution de l'azote tout au long d'un traitement, il est nécessaire de connaître ses différentes formes

- azote ammoniacal,
- azote nitreux permettant de déceler des blocages biologiques éventuels,
- azote Kjeldahl (NTK) ou azote ammoniacal et organique. Cette grandeur n'inclut pas les composés oxydés de l'azote

nitrites, nitrates et certains composés organiques nitrés. La mesure de faibles teneurs de NTK est délicate.

Il est à noter qu'en France l'ensemble de l'azote sous toutes ses formes est souvent appelé azote global (NGL).

Toutes les analyses doivent être effectuées après blocage des réactions biologiques au moment du prélèvement de l'échantillon.

5.1.7. Phosphore

L'analyse permet de distinguer trois formes différentes du phosphore

- les orthophosphates,
- les polyphosphates (hydrolyse acide),
- les organophosphates (hydrolyse acide avec oxydation).

La spectrométrie du plasma à couplage inductif permet de doser directement le phosphore total.

5.1.8. Soufre

Les sulfures peuvent être déterminés par iodométrie après fixation des sulfures, par argentimétrie avec suivi potentiométrique à l'aide d'électrode indicatrice d'argent, ou encore par colorimétrie pour les faibles teneurs. La détermination dans les ERI des autres formes réductrices est toujours plus délicate (thiosulfates, dithionates, sulfites, sulfocyanures...). Les méthodes sélectives par

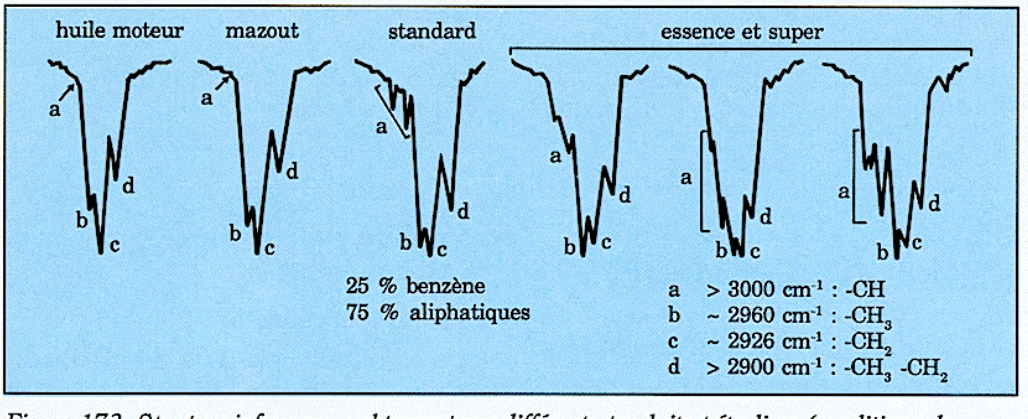


Figure 173. Spectres infrarouges obtenus pour différents produits pétroliers (conditions de détermination de l'indice CH_2).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

précipitation ou complexation sont à éviter. La chromatographie ionique est utilisable dans certaines conditions.

Pour le suivi de la méthanisation de certaines ERI, les sulfates doivent également être pris en compte.

5.1.9. Test au bleu de méthylène

Ce test, de plus en plus abandonné, a pour principe de suivre dans le temps la décoloration d'une solution de bleu de méthylène et d'apprécier la putrescibilité de l'échantillon.

Son interprétation est très souvent controversée. Il doit être utilisé avec beaucoup de prudence, car il peut fournir des indications erronées, en particulier pour les ERI qui peuvent contenir des éléments réducteurs, et pour les effluents de stations d'épuration peu chargés DBO_5 inférieure à 15 $mg.l^{-1}$) riches en sels oxydés eux-mêmes susceptibles d'une réduction anaérobie.

5.1.10. TAC

Ce paramètre doit être suivi lors de processus de nitrification (acidification) ou de dénitrification (alcalinisation) du milieu.

5.1.11. Métaux lourds

Les métaux lourds doivent être contrôlés après une minéralisation préalable de l'échantillon (spectrophotométrie d'absorption atomique). Les métaux lourds les plus recherchés sont: cadmium, mercure, plomb, chrome hexavalent, cuivre, nickel. Ils sont principalement contrôlés sur

- les effluents de traitement de surface, avant rejet au milieu récepteur ou à l'égoût,
- les effluents avant épuration biologique.

On peut aussi avoir à connaître la teneur en certains oligo-éléments favorables à la méthanisation (exemple: nickel).

5.1.12. Toxicité

La notion de toxicité est complexe: elle englobe l'action de très nombreux éléments, sous des formes très variées (complexés, ionisés, oxydés...). Elle est évaluée par un test biologique.

Celui utilisant des daphnies (NF T 90.301) peut être cité comme le plus employé. On détermine dans l'effluent l'inhibition à court terme de la mobilité de Daphnia magna (Crustacés, Cladocère) désignée par le nom commun de daphnie. On exprime les résultats en **équitox** définis comme suit: un effluent contient un équitox par m^3 si, dans les conditions de l'essai, il provoque en 24 heures l'immobilisation de 50 % d'une population de daphnies.

5.1.13. Indice de Mohlman

(voir page 162).

5.2. ESSAIS DE TRAITABILITÉ

5.2.1. Mesures de consommation d'oxygène

Les mesures utilisées pour évaluer la $DB0_5$ ou la toxicité sont pratiquées, si nécessaire, avec apport de boues ou de matériaux ensemencés.

- **Mesure en réacteur**

Un échantillon oxygéné est placé sous agitation dans un flacon fermé; la consommation d'oxygène est suivie par une sonde spécifique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Mesure manométrique par la respirométrie de Warburg**

Le respiromètre de Warburg est moins un appareil de contrôle qu'un appareil pour l'étude de l'activité respiratoire des boues activées (figure 21), utilisant un échantillon de faible volume (quelques ml).

Son principe repose sur le fait qu'à volume et à température constants, toute variation de la quantité de gaz peut être mesurée par la variation de sa pression. On peut facilement mesurer les échanges d'oxygène en absorbant le gaz carbonique dégagé dans une solution de potasse.

Le respiromètre peut être utilisé pour tester les effets toxiques de certains produits et surtout pour déterminer les coefficients respiratoires a', b', et les coefficients de production de boues a_m et b (voir page 294).

Les respiromètres de Warburg présentent cependant un certain nombre d'inconvénients car leur capacité d'oxygénation est difficilement contrôlable et les manipulations imposent des arrêts qui peuvent masquer certains phénomènes lorsque la pollution est très rapidement assimilable.

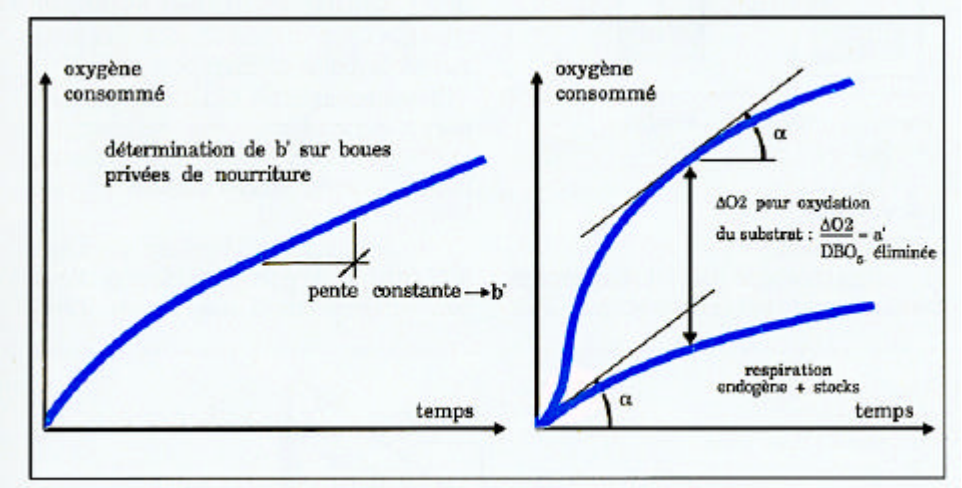


Figure 174. Principes de détermination au Warburg des coefficients respiratoires.

5.2.2. Essai de nitrification

Un effluent ensemencé par des boues nitrifiantes ou des souches spécifiques est placé sous aération et agitation dans un flacon. Le suivi des formes de l'azote NO_3, NO_2 et NH_4 est effectué tous les jours. Les courbes d'évolution des espèces azotées permettent d'apprécier la traitabilité et les cinétiques d'oxydation. Ces tests sont appliqués principalement aux ERI.

5.2.3. Essai de dénitrification

Cet essai d'orientation permet d'apprécier la cinétique de dénitrification, soit d'une ERI, soit d'une ERU nitrifiée avec ou sans ajout de carbone assimilable.

La figure 175 permet de visualiser la mise en œuvre de l'essai. Les flacons utilisés sont obturés par un septum permettant les injections et les prélèvements par seringue sans modifier l'anoxie du milieu (balayage initial à l'azote).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

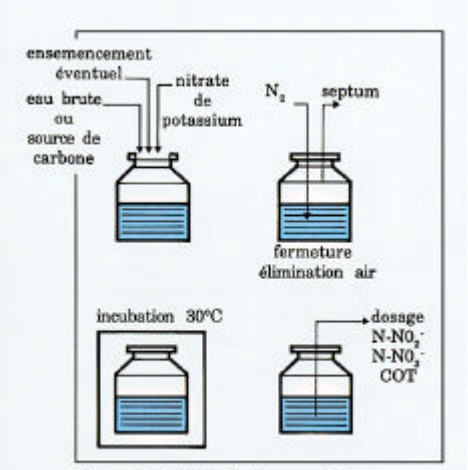


Figure 175. Principe d'un essai de dénitrification.

5.2.4. Banc d'essai

- **Milieu aérobie**

On utilise des réacteurs fonctionnant en continu ou par cuvées dans lesquels l'air est introduit généralement en excès. Les paramètres globaux DCO, DBO sont suivis en fonction du temps. Des contrôles continus de pH, potentiel redox, oxygène, COT, etc., peuvent être mis en oeuvre

La figure 176 représente un appareil de laboratoire qui constitue une véritable petite station d'épuration avec zones d'aération et de clarification. Les boues activées, après aération, sont envoyées dans la partie inférieure du cylindre de clarification et recyclées par un "émulseur" après avoir été séparées des eaux traitées. Il s'agit là d'un appareil fonctionnant en mélange intégral, ce qui simplifie les relations mathématiques que l'on peut établir à partir des paramètres de fonctionnement observés.

On peut remplacer l'émulseur par une pompe péristaltique, afin de contrôler exactement le débit de recyclage et rendre l'aération indépendante du pompage des boues de retour.

Pour acclimater une boue activée à une ERI difficile, on part généralement d'une boue prélevée dans une station d'épu-

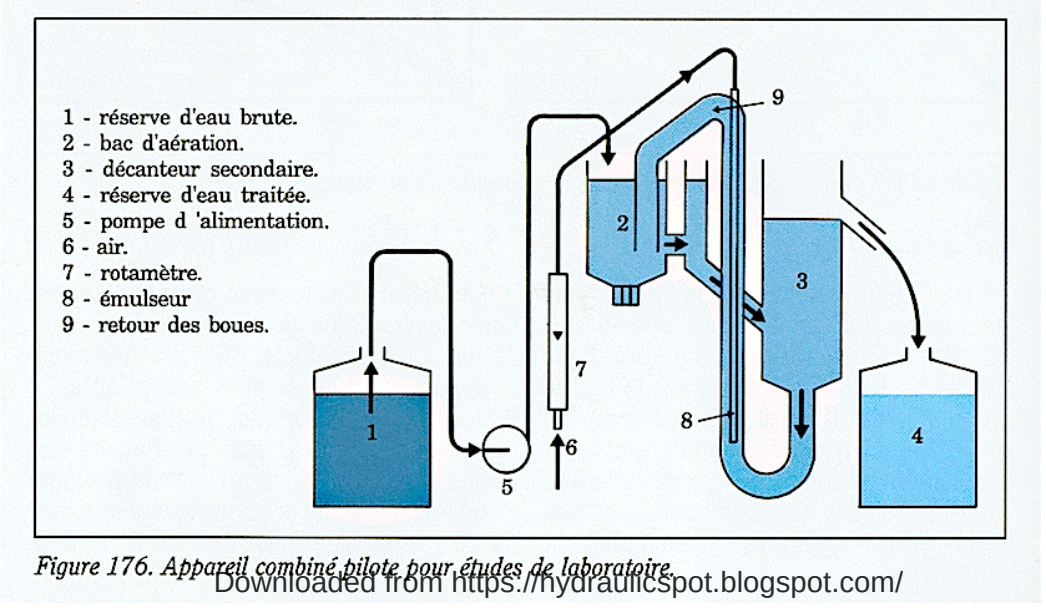


Figure 176. Appareil combiné pilote pour études de laboratoire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ration urbaine et on alimente le pilote avec un mélange d'eaux urbaines et d'eaux à tester. En une dizaine de jours, on monte progressivement la proportion d'ERI par paliers de un à deux jours. Si l'on arrive à 100 % d'ERI, on en conclut que celle-ci est traitable; sinon, on peut déterminer dans quelle proportion il faut la diluer avec une ERU pour qu'elle reste une nourriture valable pour les microorganismes. Bien entendu, cet essai doit être fait sur milieu équilibré naturellement ou artificiellement en . carbone, azote et phosphore assimilables.

- . **Milieu anaérobie**

Des fermentations discontinues en cuvées sont réalisées dans de petits réacteurs (figure 177), ensemencés par des boues de digesteurs de boues urbaines présentant une population à large spectre. Les opérations initiales se font sous bullage d'azote, puis le flacon est fermé hermétiquement. Les cuvées sont maintenues à 37 °C en étuve sous agitation. Les prélèvements de gaz et d'effluent sont effectués à intervalles réguliers pour contrôler la formation de méthane et l'abaissement de la DCO. Des analyses complémentaires peuvent être effectuées (composition du gaz, AGV sur le surnageant) de façon à mettre en évidence les étapes limitantes ou les blocages des réactions de dégradation.

Figure 177.Fermenteur de laboratoire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. EXAMEN DES BOUES

6.1. MATIÈRES EN SUSPENSION (MES) DANS LES BOUES LIQUIDES

Quand les boues sont peu concentrées, le poids sec ne doit pas prendre en compte la teneur en substances dissoutes de l'eau interstitielle de la boue. Deux méthodes sont proposées:

6.1.1. Méthode par centrifugation

Utiliser une centrifugeuse de laboratoire équipée de godets de 100 ml gradués. Remplir chaque godet de 80 ml de boue et centrifuger à 4 000-5 000 $t.min^{-1}$ pendant 10 minutes. En fin d'opération, éliminer le surnageant et récupérer soigneusement tous les culots de boue qu'on laisse sécher à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante (en général pendant au moins 12 heures).

NOTA: une floculation préalable de la boue par quelques $mg.l^{-1}$ de poly-électrolyte (floculation in-situ dans le godet) permet d'obtenir des culots homogènes très facilement récupérables sans perte de matière. Soit: M(g) la masse du résidu sec obtenu et V (ml) le volume de boue centrifugée (V =160 ou 320 ml).

$$\text{Concentration des MES} = \frac{M \times 1000}{V} g.l^{-1}$$

6.1.2. Méthode par filtration

Cette méthode est plutôt réservée aux boues assez peu concentrées (de 5 à 20 $g.l^{-1}$ par exemple).

Tarer exactement un papier filtre (type filtre sans cendre extra rapide ∅ 150, Durieux par exemple) et filtrer la boue (25 à 100 ml selon la concentration) sur entonnoir en verre. Cette méthode peut être assez longue dans certains cas de mauvaise filtrabilité de la boue. Sécher ensuite le filtre à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante.

Concentration en MES =

$$\frac{M - F}{V} \times 1000\ g.l^{-1}$$

avec:

M : masse sèche du filtre et du gâteau

F : masse du filtre seul

V : volume de boue filtrée

6.2. RÉSIDU SEC OU MATIÈRES SÈCHES (MS)

La teneur en matières sèches inclut à la fois les **matières en suspension et les sels dissous :**C'est le résidu sec appelé parfois extrait sec, utilisé aussi pour déterminer la siccité de la boue (exprimée en %).

6.2.1. Résidu sec à 105°C

La teneur en matières sèches est exprimée en $g.l^{-1}$ La méthode de mesure consiste à mettre à l'étuve à 105 °C, jusqu'à obtention d'une masse constante, un échantillon de boue (25 à 100 ml selon la concentration de la boue).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Soit Ml la masse de l'échantillon humide et M_2 sa masse après séchage.

$$\text{Siccité} = \frac{M_2 \times 100}{M_1} \%$$

6.2.2. Résidu sec à 175-185°C

Le séchage à 175-185 °C, comparé au séchage à 105 °C permet d'évaluer notamment la teneur des sels en eau de cristallisation + certaines matières volatiles.

6.2.3. Résidu sec à 550°C et matières volatiles (MV)

Le résidu est porté pendant 2 heures à 550 °C dans un four à moufle, préalablement chauffé, et thermostaté. Des capsules en silice avec environ 10 à 20 g de boue sèche finement broyée sont généralement utilisées.

La teneur en matières volatiles gazéifiées à 550 °C ne doit pas être confondue avec la **teneur en matières organiques;** ceci pour plusieurs raisons

- une partie des matières minérales et sels peut se décomposer entre 105 ° et 550 °C,
- une partie des M0, (notamment certains complexes organo-calciques ou organo-métalliques) peut ne pas se gazéifier à 550 °C mais plutôt vers 650-700 °C,
- dans le cas de boues conditionnées à la chaux, le CO_2 produit par la combustion des MO est fixé par la chaux pour donner du $CaC0_3$ qui ne se décompose qu'au-dessus de 550 °C.

Néanmoins, pour la majorité des boues, la détermination des MV est une évaluation approchée de la matière organique. Le taux de MV s'exprime généralement en % sur MS.

6.2.4. Résidu sec à 900°C

Les MV entre 550 et 900 °C sont essentiellement constituées de CO_2 de la décomposition des carbonates contenus dans les boues provenant de la carbonation approchée précédemment.

6.3. MÉTHODE RAPIDE DE DÉTERMINATION DU TAC ET DU TAUX D'ACIDES VOLATILS (AGV) DANS UNE BOUE LIQUIDE

Ces déterminations sont importantes pour la bonne exploitation du digesteur anaérobie.

Mesurer le plus exactement possible 25 ml de boues. Centrifuger ces boues une première fois à 5 000 $t.min^{-1}$ pendant 10 min. Recueillir le liquide surnageant dans un bécher de 400 ml. Reprendre le culot avec 50 ml d'eau distillée et ayant soin de ne rien perdre de la partie solide.

Centrifuger à nouveau à 5 000 $t.min^{-1}$ pendant 10 min et recueillir dans le bécher la partie surnageante. Répéter une fois encore cette opération de lavage du culot.

Le liquide recueilli contient notamment les bicarbonates et les acides volatils solubles.

6.3.1. Mesure du TAC

Le liquide récupéré dans le bécher est mis en agitation par agitateur magnétique. On plonge les électrodes d'un pH-mètre dans le liquide et on note le pH initial.

Downloaded from http https://hydraulicspot.blogspot.com/

A l'aide d'une burette au 1/10 ml, verser H_2SO_4 0,1 N jusqu'à pH = 4, soit V ml :

$$TAC = \frac{V \times 0{,}1 \times 1000}{25}$$

$$= V \times 4, \text{ en meq.l}^{-1}$$

ou:

TAC = V *x* 4 x 0,05, en $g.l^{-1}$ de $CaCO_3$

6.3.2. Mesure des AGV

On verse ensuite H_2SO_4 0,1 N jusqu'à pH = 3,5. Faire alors bouillir le liquide à pH = 3,5 pendant 3 min exactement Laisser refroidir.

Porter le liquide refroidi sous les électrodes du pH-mètre et verser sous agitation avec une burette au 1/10 NaOH 0,1 N jusqu'à pH = 4,soit V_2 le volume obtenu.

Continuer à verser jusqu'à pH = 7 et soit V3 le nouveau volume.

$$\text{Acidité volatile} = \frac{(V_3 - V_2) \times 0{,}1 \times 1000}{25}$$

$$= (V3 - V_2) \times 4, \text{ en meq.l}^{-1}$$

ou :

Acidité volatile = $(V_3 - V_2) \times 4 \times 0{,}06$ en $g.l^{-1}$ d'acide acétique.

6.4. DOSAGE DES GRAISSES ET DES HUILES

De nombreuses méthodes sont proposées pour doser les hydrocarbures, les graisses et les huiles qui sont souvent sous forme d'émulsion ou saponifiées.

Les graisses et les huiles sont séparées par filtration après acidification et addition d'une solution de chlorure de sodium. Le dépôt récupéré subit une extraction au Soxhlet (solvant à choisir

fréon, hexane, trichloréthylène, chloroforme...). Une gravimétrie finale est effectuée après distillation du solvant.

On peut utiliser la norme NF T 90.114 mais elle est surtout adaptée aux hydrocarbures solubles et en faible quantité.

6.5. TEST DE FILTRABILITÉ

6.5.1. Test de filtrabilité sous vide sur büchner

Mesure de la résistance spécifique d'une boue sous un vide de 0,5 bar.

Cette détermination permet d'évaluer aproximativement la capacité d'un filtre sous vide industriel. Elle permet également de fixer les dosages optimaux de réactifs sur filtre presse, mais il faut tenir compte dans ce cas du facteur de compressibilité.

La figure 178 décrit l'appareillage nécessaire au test. .

- **Mode opératoire**

Remplir le büchner de boue à filtrer (préalablement conditionnée); 105 ml de boue sont généralement suffisants pour l'obtention d'un gâteau final d'épaisseur 8-10 mm.

Établir le vide et rechercher rapidement la dépression voulue soit 0,5 bar (40 cm Hg environ) et veiller à ce qu'elle reste constante tout au long de l'essai.

Dès que le vide est atteint, mettre en route le chronomètre et noter le volume de filtrat déjà recueilli: volume V_o corres-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

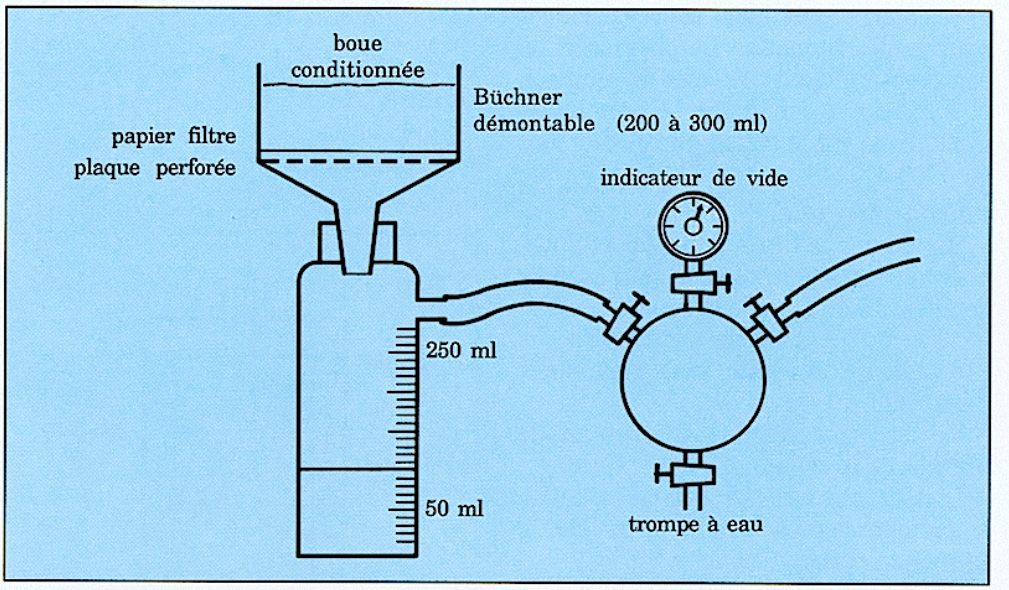


Figure 178. Test de filtrabilité sous vide de 0,5 bar.

pondant au temps t = 0 qui sera à soustraire des volumes repérés ultérieurement. Noter les volumes du filtrat recueilli au cours de l'essai pour différents temps de filtration: toutes les 10, 15, 20, 30 ou 60 secondes, selon la vitesse d'écoulement du filtrat L'essai est conduit jusqu'à essorage du gâteau (perte de vide due au craquellement du gâteau).

- **Calcul de la résistance spécifique à la filtration**

Les volumes des filtrats V_0 - V_1 - V_2 - V3 ..., correspondant aux temps T_o -T_l - T_2- T_3 ..., sont relevés. Porter sur un graphique les points ayant pour abscisse Vx et pour ordonnée :

$$\frac{T_x}{V_x - V_0}$$

Ces points sont en principe alignés (sauf en début de filtration et pendant l'essorage). La pente de la partie linéaire de la courbe obtenue est égale au coefficient a (voir chapitre 3, § 5.1.2). **La résistance spécifique** sous 0,5 bar (49 x 103 Pa) est donnée par la relation :

$$r_{0,5} = \frac{2\ a\ PS^2}{\eta C}$$

a : en $s.m^{-6}$

P : en Pascal (soit 49 X 10^3 Pa)

S : en m^2

η : en Pa.s

(à 20 °C, voisin de 1,1 X 10^{-3} Pa.s)

C : en $kg.m^{-3}$

r : en $m.kg^{-1}$

NOTA: C, résidu sec à 105 °C divisé par le volume de boues est une approximation de W (masse de MES déposée par unité de volume de filtrat).

6.5.2. Test de filtrabilité sous pression (voir figure 179).

Une cellule sous pression est utilisée non seulement pour la détermination de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

la résistance spécifique mais également pour la détermination du coefficient de compressibilité des gâteaux de filtration et pour leur siccité limite. Le principe de la méthode est le même que celui décrit en page 372.

- **Mode opératoire**

- Humidifier le filtre de papier et appliquer une légère surpression pour assurer l'étanchéité du fond de la cellule et éliminer l'excès d'eau retenu par le filtre.
- Ajuster l'éprouvette sous l'entonnoir de la cellule.
- Verser l'échantillon (100 à 150 ml) de boue dans la cellule.
- Laisser reposer 15 secondes avant d'appliquer la pression afin de faciliter la formation d'une précouche.
- Appliquer progressivement la pression choisie (0,5 à 15 bars); l'utilisation du piston est déconseillée pour des pressions inférieures à 2 bars.
- Laisser s'écouler le filtrat et noter son volume V_0 (10 % environ du volume de boue à filtrer).
- Déclencher le chronomètre et noter le volume V du filtrat en fonction du temps.

Tracer la courbe

$$\frac{T_x}{V_x - V_0} = f\ (V_x).$$

La cadence des lectures dépend du débit du filtrat

- Pour le calcul de la résistance, se reporter en page 372.

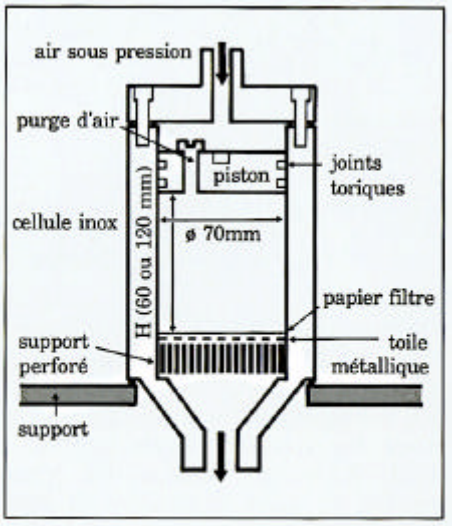


Figure 179. Cellule de test de filtrabilité sous pression.

6.6. DÉTERMINATION DU COEFFICIENT DE COMPRESSIBILITÉ

Mesurer la résistance spécifique r à la filtration sous plusieurs pressions P et tracer la courbe log r = f (log P) . S'assurer de sa linéarité et mesurer sa pente qui est égale au coefficient de compressibilité.

L'appareillage utilisé est le même que celui du test précédent.

Afin d'obtenir la précision maximale, il est souhaitable d'utiliser des pressions est souhaitable d'utiliser des pressions

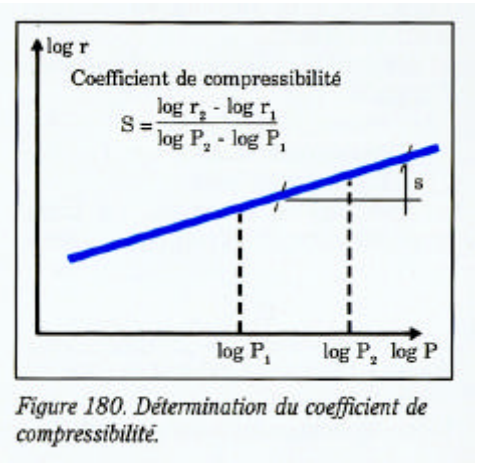


Figure 180. Détermination du coefficient de compressibilité.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

régulièrement échelonnées. Les valeurs. suivantes sont recommandées:

P = 49 kPa - 147 kPa - 441 kPa

et 13 2 3 kPa (ou pression maximale autorisée par l'équipement du laboratoire).

Le coefficient de compressibilité s'exprime sous la forme d'un nomb re sans dimension.

6.7. DÉTERMINATION DE LA SICCITÉ LIMITE

L'appareillage est identique à celui employé page 3 74.

Le piston est, dans ce cas, absolument obligatoire. Il a pour but de transmettre intégralement à la boue la pression admise dans la cellule et d'éviter que le gâteau ne se craquèle.

Le mode opératoire est le même que celui utilisé page 3 74 mais il faut effectuer, après avoir versé l'échantillon de boue dans la cellule, les opérations suivantes :

- enfoncer le piston, vis de purge enlevée, jusqu'à effleurement de la boue,
- mettre et serrer la vis de purge,
- puis reprendre le mode opératoire du test et poursuivre la mesure de la résistance spécifique jusqu'à obtention de la branche asymptotique verticale de la courbe $\frac{t}{V} = f(V)$.

En pratique, arrêter la filtration lorsque la pente de la tangente au point considéré est 5 fois supérieure à la pente de la partie rectiligne initiale. Déterminer la siccité du gâteau sous la pression choisie (à 105 °C ± 2 °C, jusqu'à poids constant).

6.8. THERMOGRAVIMÉTRIE

(Voir page 124).

6.9. TEST C.S.T.

("Capillary Succion Time")

- . **Principe**

Un échantillon de boue (conditionnée ou non) est soumis à une force de filtration engendrée par l'action capillaire d'un papier filtre absorbant.

- **Appareil** (figure 181).

L'appareil est composé de deux éléments: un bloc de filtration proprement dit et un compteur temps automatique.

L'organe de filtration est un papier filtre épais (en général Whatman n° 17 ou équivalent), pris en sandwich entre deux blocs rectangulaires de plastique transparent Un cylindre creux vient s'appuyer sur le papier filtre et sert de réservoir de boue. Le bloc supérieur se tient dégagé du papier filtre en reposant sur 5 plots lA, 1B, 2, 3, 4. lA et 1B sont des sondes encastrées sur un premier cercle concentrique au cylindre de boue. La sonde 2 est située sur un deuxième cercle concentrique. Des connexions électriques sont faites entre ces trois sondes et le déclencheur

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

temps. Les plots 3 et 4 ne servent qu'à ajuster le bloc supérieur et le papier filtre.

- **Procédure**

1. Remplir le réservoir (0 10 ou 18 mm selon la filtrabilité de la boue) avec un échantillon représentatif de boue.

S'il s'agit d'un test de contrôle, répéter le test au moins deux fois étant donné le petit volume de boue mis en oeuvre

S'il s'agit d'une étude de floculation, respecter des méthodes répétitives de conditionnement

2. Dès le remplissage du cylindre, le filtrat sous l'effet de la succion capillaire du papier filtre, s'étend progressivement, plus ou moins rapidement, hors du cylindre. La vitesse à laquelle l'auréole de filtrat s'étend concentriquement à la surface occupée par la boue, dépend de la qualité du papier mais surtout de la filtrabilité de la boue. Quand le front liquide de filtrat atteint lA et 1B, l'augmentation de conductivité entre ces deux sondes entraîne le démarrage de l'horloge. Quand le filtrat atteint la sonde 2, un changement similaire de conductivité entre elle et 1A arrête l'horloge.

L'appareil détermine donc automatiquement le temps mis par l'auréole de filtrat pour passer d'un diamètre de 32 mm à 45 mm. Les temps de référence sont de 5 à 10 secondes selon les appareils.

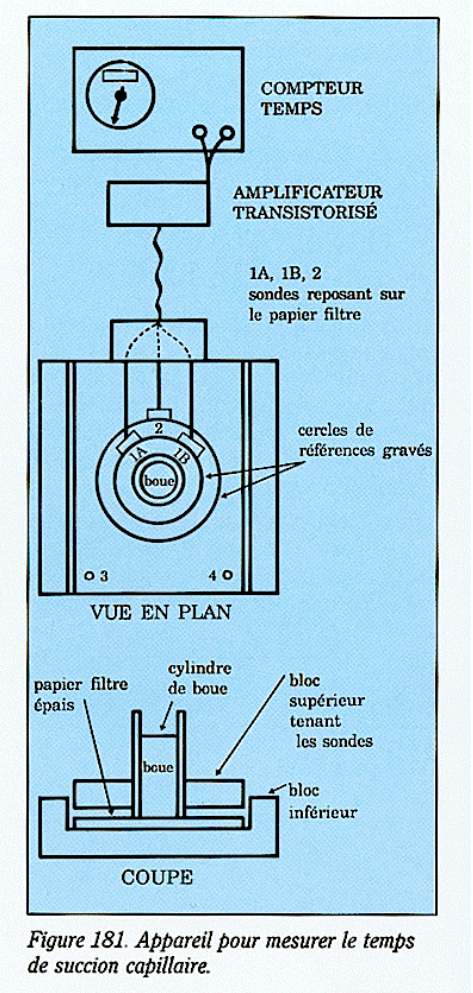


Figure 181. Appareil pour mesurer le temps de succion capillaire.

- **Interprétation**

Plus le CST est petit, meilleure est la filtrabilité de la boue. Ce test, très rapide, permet de comparer l'efficacité d'un conditionnement minéral ou thermique (formation de flocs très fins).

Dans les conditions standards d'utilisation, et pour une boue donnée (peu de variations de concentration), le CST peut être corrélé avec la résistance spécifique à la filtration. C'est donc une indication rapide et suffisante d'une filtrabilité de boue et son emploi est tout indiqué dans les installations de filtres-presses ou filtres sous vide, pour les contrôles d'exploitation.

Si le CST est utilisé pour le contrôle de la floculation par polyélectrolyte, les résultats recueillis sont peu exploitables

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

lorsqu'il y a formation de flots très différenciés de quelques mm de diamètre . Tel est le cas de la floculation nécessaire pour la mise en oeuvre .

des filtres à bandes presseuses et le test de simple drainage est alors préférable

6.10. MÉTAUX LOURDS

En vue d'épandage agricole, les teneurs en métaux lourds doivent être contrôlées.

Après une minéralisation poussée de la boue en milieu acide, la mesure des métaux peut être effectuée par ICP.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7. EXAMEN DES MATÉRIAUX GRANULAIRES ET PULVÉRULENTS

7.1. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

La nature des matériaux granulaires utilisés en traitement d'eau s'est largement diversifiée (sable, anthracite, argile expansée, charbon actif, calcaire, résines, etc.).

Préparation de l'échantillon

Pour tous les éléments granulaires, il faut rappeler que la masse de l'échantillon prélevé doit être représentative du produit livré. De même la prise d'essai assurée par l'analyste doit aussi être représentative de l'échantillon.

7.1.1. Granulométrie d'un matériau filtrant

On se reporte aux recommandations de la norme française NF X 11.507 pour effectuer les analyses granulométriques dans les meilleures conditions.

Peser 100 g de matériau (50 g dans le cas d'un charbon actif granulé) après séchage pendant 4 h à 120 °C.

Tamiser ce matériau successivement sur les tamis normalisés AFNOR n° X 11.501 (tableau 47) et noter la masse retenue sur chaque tamis.

Calculer, à partir de ces résultats, la masse de matériau qui a traversé chaque tamis (total du matériau retenu ou non sur tous les tamis de dimension inférieure à celui considéré) et l'exprimer en pourcentage de la masse de matériau utilisé pour l'analyse.

Tracer la courbe représentant ces pourcentages en fonction des vides de maille de chaque tamis (cf figure 182).

A cet effet, utiliser de préférence un graphique à abscisse logarithmique.

- **Taille effective (TE)**

C'est la taille correspondant au pourcentage 10. . Coefficient d'uniformité

Lire sur le graphique la taille correspondant au pourcentage 60.

Le coefficient d'uniformité est le rapport

$$CU = \frac{\text{taille des } 60\,\%}{\text{taille des } 10\,\%}$$

Il est souhaitable qu'il soit inférieur à 1,6. On peut accepter des coefficients allant jusqu'à 1,8.

Remarques: le tableau 47 donne la correspondance des tamis de contrôle utilisés dans les normes anglaise, américaine, etc.

Pour des matériaux de formes très particulières (en bâtonnets par exemple), il est fréquent de définir le diamètre équivalent du matériau de forme granulaire donnant une perte de charge comparable.

7.1.2. Friabilité

On chiffre la friabilité d'un matériau en appréciant la quantité de matériau utilisable après broyage, c'est-à-dire ayant la même taille effective que l'échantillon initial.

- **Mode opératoire**

L'essai de friabilité se fait sur 35 ml de matériau exactement pesés. Le matériau

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 47. Dimensions nominales normalisées des mailles de toile.

ISO/GRANDE-BRETAGNE			FRANCE/ALLEMAGNE			USA		
IS0565-1983/BSI410-1986			NFX11.501-1970/DIN4188-1977			ASTM E11-87-1987		
Principale	Supplémentaires		Principale	Supplémentaires		Désignation		
µM	1° µm	2° µm	µm	1° µm	2° µm	mm	Inches	Mesh
125			125			125	5	5 in.
	112				112			
		106				106	4,24	4,24 in.
	100		100			100	4	4 in.
90				90		90	3,5	3 1/2 in.
	80		80					
		75				75	3	3 in.
	71				71			
63			63			63	2,5	2 1/2 in.
	56				56			
		53				53	2,12	2,12 in.
	50		50			50	2	2 in.
45				45		45	1,75	1 3; 4 in.
	40		40					
		37,5				37,5	1,5	1 1/2 in.
	35,5				35,5			
31,5			31,5			31,5	1,25	1 1/4 in.
	28				28			
		26,5				26,5	1,06	1,06 in.
	25		25			25	1	1 in.
22,4				22,4		22,4	0,875	7/8 in.
	20		20					
		19				19	0,750	3/4 in.
	18				18			
16			16			16	0,625	5/8 in.
	14				14			
		13,2				13,2	0,53	0,53 in.
	12,5		12,5			12,5	0,500	1 '2 in.
11,2				11,2		11,2	0,438	7116 in.
	10		10					
		9,50				9,5	0,375	3/8 in.
	9				9			
8			8			8	0,312	5/16 in.
	7,10				7,10			
		6,70				6,70	0,265	0,265 in.
	6,30		6,30			6,30	0,250	1/4 in.
5,60				5,60		5,60	0,223	3 1; 2 in.
	5		5					
		4,75				4,75	0,187	4 in.
	4,50				4,50			
4			4			4	0,157	5 in.
	3,55				3,55			
		3,35				3,35	0,132	6 in.
	3,15		3,15					
2,80				2,80		2,80	0,11	7 in.
	2,5		2,50					
		2,35				2,36	0,0937	8 in.
	2,24				2,24			
2			2			2	0,0787	10 in.
	1,80				1,80			
		1,70				1,70	0,0661	12 in.
	1,60		1,60					
1,40				1,40		1,40	0,0555	14 in.
	1,25		1,25					
		1,18				1,18	0,469	16 in.
	1,12				1,12			
1			1			1	0,0394	18 in.
	0,90				0,90			

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/.

ISO / GRANDE-BRETAGNE			FRANCE / ALLEMAGNE			USA		
ISO 565 -1983 / BSI 410 -1986			NF X 11.501-1970 / DIN 4188 -1977			ASTM Ell-87 -1987		
Principale	Supplémentaires		Principale	Supplémentaires		désignation		
	1° µm	2° µm		1° µm	2° µm	mm	Inches	Mesh
		850				850	0,0331	20
	800		800					
710				710		710	0,0278	25
	630		630					
		600				600	0,0234	30
	560				560			
500			500			500	0,0197	35
	450				450			
		425				425	0,0165	40
	400		400					
355				355		355	0,0139	45
	315		315					
		300				300	0,0117	50
	280				280			
250			250			250	0,0098	60
	224				224			
		212				212	0,0083	70
	200		200					
180				180		180	0,0070	80
	160		160					
		150				150	0,0059	100
	140				140			
125			125			125	0,0049	120
	112				112			
		106				106	0,0041	140
	100		100					
90				90		90	0,0035	170
	80		80					
		75				75	0,0029	200
	71				71			
63			63			63	0,0025	230
	56				56			
		53				53	0,0021	270
	50		50					
45				45		45	0,0017	325
	40		40					
		38				38	0,0015	400
	36				36			
32			32			32	0,0012	450
	28				28			
25			25			25	0,0010	500
	22				22			
20			20			20	0,0008	635
16								
12,5								
10								
8								
6,3								
5								

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

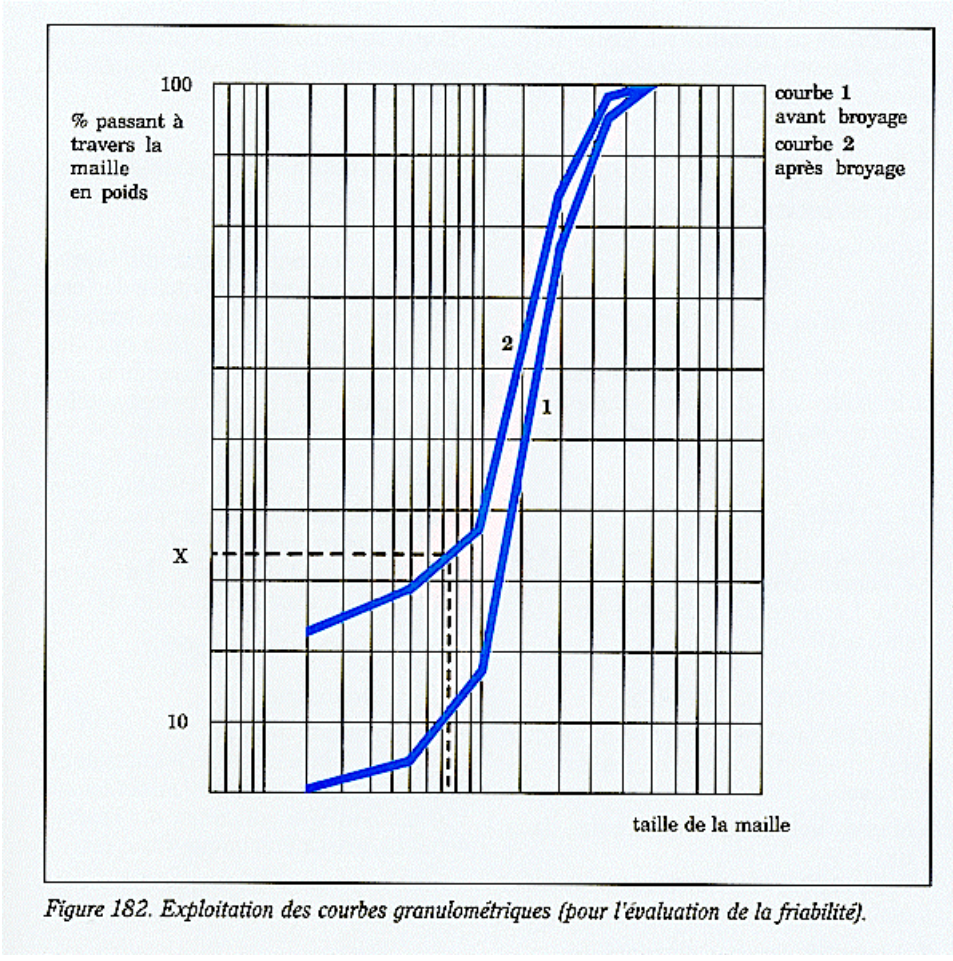


Figure 182. Exploitation des courbes granulométriques (pour l'évaluation de la friabilité).

est introduit dans un cylindre métallique dont le diamètre intérieur est de 40 mm et la hauteur utile de 100 mm. Ce cylindre est fixé radialement sur une roue de diamètre égal à 34 cm. On fait tourner cette roue autour d'un axe passant par son centre à une vitesse de 25 $t.min^{-1}$ A l'intérieur du cylindre sont introduites également 18 billes d'acier de ∅ 12 mm.

La mesure de la friabilité s'effectue obligatoirement sur un même échantillon de matériau filtrant en trois mesures successives. Dans une première mesure, on détermine la granulométrie du matériau testé, puis après avoir recueilli de chaque tamis l'ensemble du matériau, on effectue deux mesures: l'une après 15 minutes de fonctionnement (750 coups, soit 375 tours) et l'autre après 30 minutes (1500 coups, soit 750 tours). Après chaque expérience, on établit la courbe de granulométrie du matériau.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Calcul de la friabilité** (cf. figure 182)

X représente, après concassage, le pourcentage de matériau de taille inférieure à la "taille effective" initiale, la fraction de taille supérieure est de (100 - X) % et représente les 90 % du matériau utilisable après concassage. On peut donc utiliser

$$\frac{100}{90}(100 - X)$$

$$\frac{10}{9}(X - 10).$$

la perte est en % :

Cette perte est la caractéristique mesurant la friabilité du matériau et le tableau 48 en donne les limites pour les principaux matériaux.

7.1.3. Perte à l'acide

C'est la perte de poids après contact de 24 heures avec une solution d'HCl à 20 %. La perte à l'acide doit être inférieure à 2 %.

7.1.4. Masses volumiques

Pour ces mesures, il est bon de vérifier l'étalonnage des volumes lus sur les éprouvettes.

- **Masse volumique apparente dans l'air**

Peser 100 g de matériau, les verser dans une éprouvette graduée.

Soit V le volume lu sur l'éprouvette. La masse volumique apparente du matériau non tassé est

$$\rho a = \frac{100}{V}\ g.ml^{-1}$$

On peut aussi mesurer la masse volumique du matériau après tassage dans l'éprouvette.

- **Masse volumique apparente après lavage et écoulement gravitaire de l'eau**

Prendre environ 100 g de matériau et les verser dans un bécher. Bien mouiller avec l'eau distillée et chasser tout l'air présent dans les grains en faisant bouillir et en agitant pendant 5 minutes.

Après refroidissement, faire écouler gravitairement l'eau interstitielle. Peser 100 g de matériau mouillé et les verser dans une éprouvette graduée. Soit V' le volume lu sur l'éprouvette. La masse volumique du matériau mouillé est

$$\rho'a = \frac{100}{V'}\ g.ml^{-1}$$

- **Masse volumique vraie**

- Matériau non poreux

Peser 50 g de matériau et les introduire dans une éprouvette de 2 5 0 ml contenant 100 ml. Soit V le volume lu sur l'éprouvette. La masse volumique vraie est

$$\rho = \frac{50}{V - 100}\ mg.l^{-1}$$

Tableau 48. Limites de friabilité

Matériau	**Sable biolite, anthracite**		**Charbon actif**	
Domaine d'utilisation normale	15 minutes 750 coups	30 minutes 1500 coups	15 minutes 750 coups	30 minutes 1500 coups
Très bon	6 à 10%	15 à 20 %	6 à 25 %	30 - 50
Bon	10-15%	20-25%		
Médiocre	15 - 20 %	25 - 35		
A rejeter absolument	> 20 %	> 35 %	> 35 %	> 60 %

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Matériau poreux**

Peser 50 g de matériau et les introduire dans l'éprouvette de 250 ml, à col rodé et munie d'une prise à vide, contenant 100 ml d'eau. Relier l'éprouvette à un système de dépression, et maintenir une dépression de -800 mbar pendant 15 min.

Après "cassage" du vide, soit V le volume lu sur l'éprouvette. La masse volumique vraie est

$$\rho = \frac{50}{V - 100}\ g.ml^{-1}$$

7.1.5. Humidité

Cette mesure s'applique à la fois aux matériaux en grains ou pulvérulents (CAP, par exemple).

Peser exactement environ 50 g de matériau filtrant (ou 5 g de matière pulvérulente), soit Pl ce poids. Placer l'échantillon dans une étuve à 120 °C pendant 4 h. Après refroidissement dans un dessiccateur, peser à nouveau le matériau, soit P2 le poids obtenu.

Le pourcentage d'humidité H s'exprime par

$$H = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \text{ en \% du poids.}$$

7.2. ÉTUDE DU POUVOIR ADSORBANT D'UN CHARBON

7.2.1. Granulométrie d'un charbon actif en poudre (CAP)

Sécher le charbon pendant 4 heures à 120 °C. Peser avec exactitude environ 10 g de charbon que l'on dépose sur le premier tamis (125 µm). Après l'avoir mouillé, on passe le tamis sous le jet du robinet d'eau sous pression, en lavant le charbon qui reste sur le tamis. On lave, en vérifiant dans un pot émaillé blanc, qu'il ne passe plus de charbon à travers le tamis. Mettre alors le tamis à l'étuve pendant 4 heures à 120 °C pour séchage. Peser ce qui est resté sur le tamis. Calculer par différence avec le chiffre original la quantité de charbon qui est passée à travers le tamis. Exprimer le rapport en pourcentage.

Opérer de même avec les tamis de taille inférieure (90-63-45 µm).

7.2.2. Isotherme d'adsorption

Le pouvoir adsorbant d'un charbon actif peut être estimé à l'aide d'une isotherme d'adsorption dite de Freundlich vis-à-vis d'un polluant donné.

Le modèle de Freundlich établit la relation entre la masse de polluant retenue par unité de. masse de charbon $\frac{X}{M}$ et la m concentration du polluant étudié à l'équilibre C_e avec le charbon.

$$\frac{X}{M} = K\ C_e^{\,n}$$

K et n, deux coefficients définis par l'expérience.

A partir de ces courbes isothermes, on peut définir

- une capacité normale d'adsorption d'un charbon qui permet d'estimer la masse maximale de polluant retenue par unité de masse de charbon, pour une concentration de polluant à l'équilibre égale à la concentration initiale de polluant introduite,
- un indice d'adsorption d'un polluant défini comme la masse de polluant retenue

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

par unité de masse pour une concentration de polluant égale à un dixième de la concentration initiale de polluant. Cet indice permet d'estimer la capacité d'adsorption du charbon pour des conditions moyennes proches du fonctionnement habituel du charbon,

- un indice définissant pour un polluant le taux de traitement nécessaire pour passer d'une concentration à une autre.

L'utilisateur doit être attentif aux conditions opératoires utilisées pour la définition de ces paramètres par les différents fournisseurs.

7.2.1.1. Établissement d'une isotherme

- Prendre 6 flacons de 1,2 litre en verre.
- Introduire 1 litre de l'eau contenant le polluant dont on désire étudier l'élimination.
- Si on étudie une eau naturellement polluée, on introduit l'eau telle qu'elle se trouve.
- Si on étudie une eau synthétique, on introduit généralement une masse de 1 mg du polluant testé dans chaque flacon.
- Réduire le charbon étudié à l'état de poudre en le pulvérisant dans un mortier et en le tamisant par voie sèche sur un tamis de 40 µm. On retient les particules passant à travers le tamis.
- Sécher le charbon 4 h à 120 °C dans un poudrier.
- On introduit des doses de charbon croissantes exactement pesées dans les flacons contenant l'eau polluée à étudier

Flacon n°	1	2	3	4	5	6
Dose ($mg.l^{-1}$)	0	10	20	30	40	50

Après une heure d'agitation modérée (30 à 40 tours/min-1) à température constante, on filtre chaque échantillon sur une membrane d'acétate de cellulose de 0,45 µm. Éliminer les 100 premiers milli-litres et doser le polluant restant sur le reste du filtrat Pour chaque dose de charbon, on obtient ainsi la concentration à l'équilibre du polluant dans l'eau après contact. Tracer la courbe isotherme en cordonnées log-log en portant en abscisse la concentration à l'équilibre exprimée en mgl^{-1} et en ordonnée la masse de polluant (mg) retenue par gramme de charbon (figure 183).

7.2.1.2. Étude cinétique

Dans le cas de charbons en grains on peut aussi réaliser la mise en contact sans broyer le charbon, en poursuivant l'agitation sur une durée importante (plusieurs semaines). La mesure de la concentration à l'équilibre à différents temps de contact permet la modélisation de l'adsorption du polluant étudié.

7.2.3. Cendres du charbon

Peser exactement environ 1 g de charbon sec et l'introduire dans un creuset à calcination, soit Pl le poids pesé.

Calciner le charbon étudié à 625 °C (± 25 °C). Bien vérifier que la calcination est complète. Après refroidissement, peser les cendres, soit P2.

On exprime la teneur en cendre C

$$C = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \text{ en } \%$$

7.2.4. Indice d'iode

L'indice d'iode représente le nombre de milligrammes d'iode absorbés par gramme de charbon pour une concentration en iode résiduel dans le filtrat de 0,02 N. La capacité d'adsorption d'un charbon dépend de la concentration du milieu à adsorber avec lequel il est en contact. Par conséquent, la concentration du filtrat doit être connue de façon à pouvoir appliquer un facteur de correction afin d'être en accord avec la définition.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

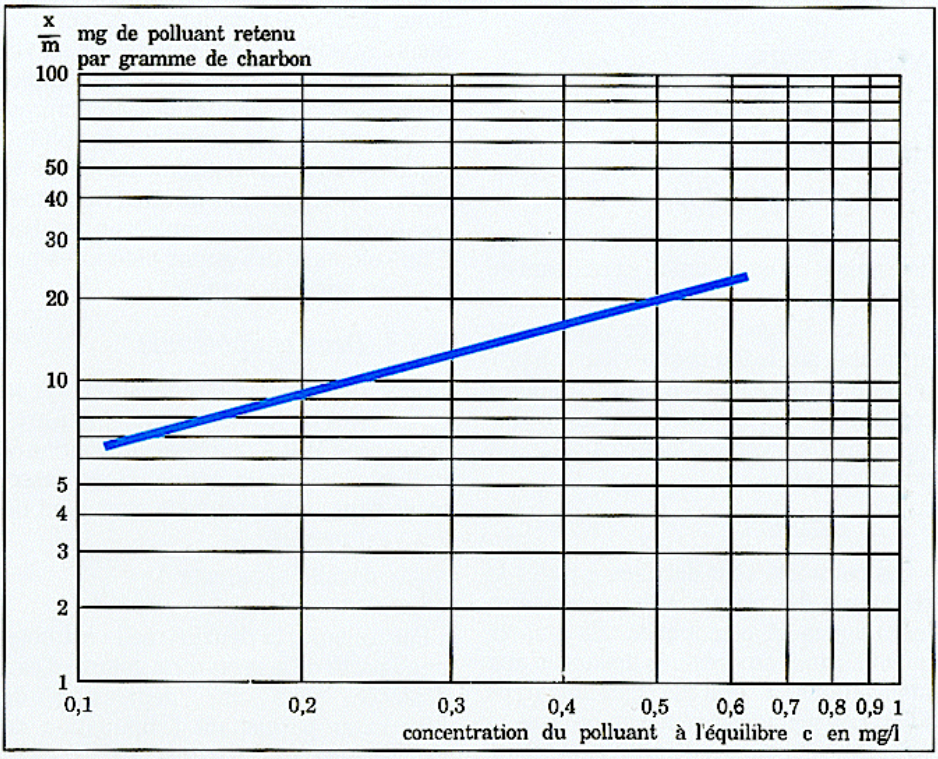


Figure 183. Exemple d'isotherme d'adsorption d'un charbon actif ($\frac{x}{m} = c^n$).

7.2.5. Pouvoir de déchloration

On caractérise le pouvoir déchlorant d'un charbon nécessaire pour obtenir une réduction de la moitié de la dose de chlore existante pour une vitesse de percolation de 20m.h^{-1}.

Débarrasser tout le charbon de l'air qu'il est susceptible de contenir en le faisant bouillir dans de l'eau distillé. Placer le charbon humide à l'abri de l'air dans un tube (diamètre 22mm), jusqu'à obtention d'une colonne de 10cm de hauteur exactement mesurée.

Préparer une solution d'eau chlorée contenant 10mg.l^{-1} de chlore actif avec une solution d'hypochlorite de sodium, à pH 7,5.

Faire passer cette eau chlorée sur la colonne de charbon à la vitesse de 20m.h^{-1}. Après 30 minutes de fonctionnement, titrer exactement l'eau chlorée à sortie de la colonne (soit a mg.l^{-1}) et à la sortie de la colonne (soit b mg.l^{-1}).

H étant la hauteur de couche en cm, calculer la longueur de demi-déchloration G :

$$G = \frac{0{,}301.h}{\log \frac{a}{b}} \text{ cm}$$

Ce test peut être reproduit avec les mêmes conditions opératoires pour d'autres oxydants comme les chloramines, le dioxyde de chlore,etc.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7.3. ANALYSES SPÉCIFIQUES DES RÉSINES

7.3.1. Granulométrie

La granulométrie d'une mesure est déterminée à l'état humide en utilisant de préférence une tamiseuse travaillant sous eau. 50 ou 100 ml de résine sont introduits sur le tamis supérieur. Le protocole défini en page 378 peut être suivi à condition d'effectuer les mesures sur chaque tamis en volume pour calculer les pourcentages.

7.3.2. Attrition

Ces contrôles sont destinés à tester la résistance des résines à des contraintes mécaniques et osmotiques. Ils s'appliquent surtout aux résines destinées aux installations à procédé continu (type ECI). Les méthodes sont nombreuses et variées; celle qui est décrite ci-après, utilisant un appareillage DEGRÉMONT, est la plus représentative des efforts imposés à la résine dans les systèmes d'échange d'ions en continu.

Un échantillon de résine est placé dans un tube dont il n'occupe qu'une partie du volume intérieur. Ce tube est fermé à ses deux extrémités par un tamis plastique permettant le passage des liquides mais non de la résine. Le test consiste à faire passer successivement, à très grande vitesse et pendant des temps courts, des réactifs à concentration élevée et permettant de réaliser des cycles de saturation et de régénération.

Ces réactifs (acide et soude) sont injectés de bas en haut et chaque phase d'injection est séparée de la suivante par un rinçage à l'eau de haut en bas; on a, donc, lors des injections, des déplacements rapides du piston de résine suivis de chocs contre les éléments filtrants, des montées en pression et des décompressions brutales, des variations de volume rapides dues aux changements d'états et des variation de concentration importantes. Après 30 cycles complets on procède à un comptage des grains détériorés par examen microscopique.

7.3.3. Densité apparente

Cette densité doit être mesurée sur la résine sous sa forme de livraison. Après avoir pesé 100 g de résine, le volume V (ml) occupé par la résine, après tassement dans une éprouvette contenant de l'eau est mesuré

densité apparente d = 100/V

Par ailleurs, la densité réelle est obtenue à partir de la mesure du volume d'eau déplacée sous une dépression de 800 mbar permettant l'élimination de l'air occlus dans les pores.

7.3.4. Capacités

7.3.4.1. Cations - Mesure de la capacité totale

- Pour les **résines cationiques faiblement acides.**

Un échantillon de résine, régénéré à saturation à l'acide chlorhydrique et rincé, est mis en contact avec une quantité connue de soude. On titre ensuite la soude en excès et on mesure exactement le volume de résine. La soude consommée rapportée à ce volume donne la capacité totale.

- Pour les **résines cationiques fortement acides.**

Un échantillon de résine est régénéré à saturation à l'acide chlorydrique et rincé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

On fait percoler ensuite une solution de NaCI jusqu'à neutralité au papier pH. On titre dans l'effluent l'acidité déplacée et on mesure exactement le volume de résine. L'acidité libérée rapportée à ce volume donne la capacité totale appelée parfois, dans ce cas, capacité forte.

7.3.4.2. Anions - Mesure de la capacité forte et de la capacité totale

(résines anioniques faiblement et fortement basiques)

Un échantillon de résine est régénéré à saturation avec de la soude et rincé. On fait percoler ensuite une solution de NaCI jusqu'à neutralité au papier pH. On titre dans l'effluent l'alcalinité déplacée; rapportée au volume de résine, elle donne la capacité forte. Ce même échantillon de résine est ensuite mis en contact avec une quantité connue d'HCl. On titre alors l'excès d'acide; la fraction consommée représente la capacité faible de la résine. La capacité totale est obtenue en faisant la somme des fonctions forte et faible ainsi mesurées.

7.3.5. Pollution des résines

- **Matières organiques**: un volume de résine est mis en contact avec un volume connu d'une solution de NaCI (100 $g.l^{-1}$) et de NaOH (20 $g.l^{-1}$) pendant 12 heures. On dose ensuite l'oxydabilité au permanganate de cet effluent; rapportée au volume de résine, elle donne la quantité de matières organiques éluées, exprimée en masse d'oxygène par litre de résine.
- **Fer**: un volume connu de résine est mis en contact avec un volume connu d'acide chlorydrique maintenu à température de 80 à 90 °C pendant 30 minutes. Le dosage du fer dans cet effluent permet de calculer la masse de fer éluée par litre de résine.
- **Silice:** un volume connu de résine est mis en contact avec un volume connu de lessive de soude maintenue à une température de 80 °C. Le dosage de la silice dans l'effluent permet de calculer la masse de silice éluée par litre de résine.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6
LES ORGANISMES AQUATIQUES

Figure 184.

1. GÉNÉRALITÉS

C'est dans l'eau que la vie a pris naissance: une grande partie des phénomènes vitaux s'y déroule, tant dans le milieu marin originel que dans les lacs, rivières, étangs, barrages, etc.

Beaucoup de ces phénomènes sont utiles ainsi l'auto-épuration permet la reminérali-sation, notamment par voie bactérienne, de la masse de composés organiques élaborée par photosynthèse ou d'origine humaine.

De même, le traitement et l'épuration biologique des eaux sont des applications de la "domestication" de micro-organismes aquatiques par l'homme.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Inversement, la vie dans les eaux peut être une gêne pour l'environnement aquatique si elle est excessive (phénomènes d'eutrophisation accélérée) ou pour l'homme. Dans le milieu naturel même, les micro-organismes peuvent générer des composés difficiles à éliminer et communiquant à l'eau des goûts intenses de terre, vase ou moisi... Ils peuvent, en attaquant les parois des conduites, engendrer des phénomènes d'eaux rouges et turbides (ferrobactéries). Enfin, par leur nature même, ils peuvent porter atteinte à la santé du consommateur (micro-organismes pathogènes).

Ce chapitre, consacré à la biologie des eaux douces après un rappel de la classification généralement adoptée pour ces organismes, présente quelques clefs simplifiées d'identification qui ne devront pas dispenser le lecteur de se reporter à des ouvrages spécialisés pour une détermination précise.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. PRINCIPE DE CLASSIFICATION DES ÊTRES VIVANTS

On distingue trois règnes: bactérien, animal et végétal. Le premier se trouve à la limite inférieure des deux autres. Quant aux virus, grosses molécules d'acide nucléique (combiné à des protéines), on peut considérer qu'ils marquent la frontière entre la vie et la matière inerte; ils forment un monde à part, qu'on peut isoler de la vie "cellulaire" représentée par les trois règnes précités.

On trouve (pages 392 à 395) un tableau simplifié pour chaque règne, où ne figurent que certaines subdivisions (embranchement, classe, ordre, famille et genre) et où ne sont développés que les groupes qui présentent un intérêt par leur vie en milieu aquatique. A l'échelon de l'ordre, de la famille et du genre, ne sont cités que quelques exemples isolés, à titre d'illustration: on trouve de plus amples détails dans les sous-chapitres de la bactériologie et de l'étude du plancton.

2.1. RÈGNE BACTÉRIEN

Il est composé d'organismes microscopiques unicellulaires, isolés ou coloniaux. Il se distingue des deux autres règnes par de nombreuses caractéristiques; en particulier, les bactéries sont des Procaryotes (dépourvus de membrane nucléaire), ce caractère étant toutefois partagé avec les Cyanophycées (voir plus loin: Protistes procaryotes).

Néanmoins, on trouve aussi chez les bactéries des affinités pour chacun des deux règnes suivants; dans la classification des bactéries proposée ici (PRÉVOT, 1961), on trouve en effet quatre embranchements : à côté de celui des bactéries vraies (Eubacteria), les trois autres présentent certaines analogies soit avec les champignons (Mycobacteria), soit avec les algues (Algobacteria), soit les animaux unicellulaires ou protozoaires (Protozoobacteria).

2.2. RÈGNE VÉGÉTAL

A la base de la classification, on trouve les Myxomycètes (champignons inférieurs) et les Eumycètes (champignons supérieurs). Puis viennent les nombreux embranchements d'algues, à partir desquels, à travers les Bryophytes (mousses) puis les Ptéridophytes (cryptogames vasculaires), on parvient aux végétaux supérieurs.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

RÈGNE BACTÉRIEN

Embranchement	Classe	Ordre	Famille	Genres (exemples) *
Eubacteria	Asporulales	Micrococcales	Neisseriaceae	Neisseria
			Micrococcaceae	**Streptococcus,** Staphylococcus
		Bacteriales	Pseudomonadaceae	**Pseudomonas,** Serratia
			Enterobacteriaceae	**Escherichia, Salmonella,** Shigella
			Parvobacteriaceae	Pasteurella, Brucella
			Ristellaceae	Ristella
			Protobacteriaceae	**Nitrobacter, Nitrosomonas, Thiobacillus**
			Bacteriaceae	Bacterium, Lactobacillus
		Spirillales	Vibrionaceae	**Vibrio,** Cellvibrio
			Spirillaceae	Spirillum
	Sporulales	Bacillales	Bacillaceae	**Bacillus** (B. subtilis)
			Innominaceae	Innominatus
		Clostridiales	Endosporaceae	Endosporus
			Clostridiaceae	**Clostridium** (Cl. perfringens)
		Plectridiales	Terminosporaceae	Terminosporus
			Plectridiaceae	Plectridium
		Sporovibrionales	Sporovibrionaceae	**Sporovibrio** (ou **Desulfovibrio**)
Mycobacteria	Actinomycetales	Actinobacteriales	Sphaerophoraceae	Sphaerophorus
			Actinomycetaceae	**Actinomyces,** Nocardia
			Streptomycetaceae	**Streptomyces,** Micromonospora
		Mycobacteriales	Mycobacteriaceae	Mycobacterium
	Myxobacteriales	Myxococcales	Myxococcaceae	Myxococcus
		Angiobacteriales	Archangiaceae	Archangium
			Sorangiaceae	Sorangium
			Polyangiaceae	Polyangium, Chondromyces
		Asporangiales	Cytophagaceae	Cytophaga, Flexibacter
	Azotobacteriales	Azotobacteriales	Azotobacteriaceae	Azotobacter
Algobacteria	Siderobacteriales	Chlamydobacteriales	Chlamydobacteriaceae	**Sphaerotilus, Leptothrix**
			Crenothricaceae	**Crenothrix,** Clonothrix
			Siderocapsaceae	Siderorapsa, Sideromonas, Ferrobacillus
		Caulobacteriales	Caulobacteriaceae	Caulobacter
			Gallionellaceae	**Gallionella**
	Thiobacteriales	Rhodothiobacteriales	Thiorhodaceae	Thiocystis, Chromatium
			Thiobacteriaceae	Thiobacterium, Thiospira
			Athiorhodaceae	Rhodopseudomonas
		Chlorobacteriales	Chlorobacteriaceae	Chlorobium, Pelodyction
			Chlorochromatiaceae	Chlorochromatium
		Leucothiobacteriales ou Beggiatoales	Beggiatoaceae	**Beggiatoa, Thiothrix**
			Achromatiaceae	Achromatium
Protozoobacteria	Spirochaetales	Spirochaetales	Spirochaetaceae	Spirochaeta
			Treponemaceae	Treponema, Leptospira

* En caractère gras, les genres les plus fréquemment cités en traitement des eaux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

RÈGNE VÉGÉTAL

Embranchement ou sous-embranchement	Classe (exemples)	Ordre (exemples)	Famille (exemples)	Genre (exemples)
— *Thallophytes* (Cryptogames cellulaires) :				
— Myxomycètes	Myxogastromycètes	Physarales	Didymiacées	Didymium
— Eumycètes	Phycomycètes	Leptomitales	Leptomitacées	Leptomitus
	Zygomycètes	Mucorales	Mucoracées	Mucor
	Ascomycètes	Aspergillales	Aspergillacées	Aspergillas
	Basidiomycètes	Agaricales	Amanitacées	Amanita
— Chlorophytes (algues vertes)	Chlorophycées	Volvocales	Chlamydomonadacées	Chlamydomonas
		Chlorococcales	Hydrodictyacées	Pediastrum
		Ulothrichales	Ulothricacées	Hormidium
		Chaetophorales	Chaetophoracées	Draparnaldia
		Conjugales	Zygnematacées	Spirogyra
— Euglénophytes	Euglénophycées	Euglénales	Euglénacées	Euglena
— Chrysophytes (algues jaunes)	Bacillariophycées ou Diatomées	Centrales	Araphidées	Cyclotella
				Synedra
		Pennales	Monoraphidées	Rhoicosphenia
			Biraphidées	Navicula
	Chrysophycées	Ochromonadales	Synuracées	Synura
	Xanthophycées ou Hétérokontes	Heterotrichales	Heterotrichacées	Tribonema
		Heterosiphonales		Vaucheria
— Cyanophytes (algues bleues)	Myxophycées	Chroococcales	Chroococcacées	Microcystis
		Hormogonales	Oscillatoriacées	Oscillatoria
— Rhodophytes (algues rouges)	Rhodophycées	Bangiales		Bangia
		Floridées		Batrachospermum
— Pyrrhophytes	Cryptophycées	Cryptomonadales		Cryptomonas
	Dinophycées (ou Péridiniens)	Péridiniales		Peridinium
		Dinocapsales		Gleodinium
— Phaeophytes (algues brunes)	Phaeophycées	Fucales		Fucus
— *Bryophytes* (Muscinées)	Hépatiques	Jungermanniales		Riccia
	Mousses	Sphagnales		Sphaigne
— *Ptéridophytes* (Cryptogames vasculaires)	Filicinées			Fougères
— *Spermatophytes* ou *phanérogames :*				
— Gymnospermes	Coniférales	Abiétales	Pinacées	Sapin
— Angiospermes	Monocotylédones	Fluviales	Potamogétonacées	Potamogeton
		Glumiflores	Graminées	Céréales
		Cypérales	Juncacées	Jonc
			Cypéracées	Carex
		Spadiciflores	Lemnacées	Lemna, Wolffia
		Pandanales	Typhacées	Typha
	Dicotylédones	Ranales	— Cératophyllacées	Ceratophyllum
			— Nymphéacées	Nuphar, Nymphaa
		Légumineuses	Papilionacées	Pois, haricot
		Fagales	Fagacées	Chêne, Hêtre

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.3.
RÈGNE ANIMAL

Les organismes les plus simples sont les animaux unicellulaires (protozoaires) qui comportent de nombreuses formes parasites (chez les flagellés, seules les Polymastigines et les Diplomonadines comportent des formes libres; les Sporozoaires sont tous parasites).

Dans le plancton et dans la faune des boues activées, on trouve de nombreux protozoaires dont la signification et le rôle sont très importants.

Les spongiaires sont le terme de passage du protozoaire au Métazoaire, l'éponge primitive se présentant comme une colonie de protozoaires différenciés. Puis, à mesure qu'on progresse vers les animaux supérieures, on rencontre des embranchements importants au point de vue planctonique, en particulier chez les vers, les Vermidiens (Rotifères) et les Arthropodes (crustacés et larves d'insectes).

Le système de classification proposé ici ne peut être considéré comme universel, il existe des variantes.

RÈGNE ANIMAL Sous-règne I. **Protozoaires**

Embranchement	Classe (exemples)	Ordre (exemples)	Genre (exemples)
Rhizopodes	Amibiens		Amœba
	Foraminifères		Polystomella
	Radiolaires		
	Heliozoaires		Actinophrys
Flagellés	Zooflagellés	Herpetomonadines	Trypanosome
		Polymastigines	Trichomonas
		Diplomonadines	Lamblia
		Hypermastigines	
Sporozoaires	Télosporidies	Grégarines	
		Coccidies	
	Cnidosporidies	Hémosporidies	Plasmodium
Protociliés		Opalines	
Infusoires	Ciliés	Holotriches	Paramecie, Coleps
		Heterotriches	Stentor
		Peritriches	Vorticelle
		Hypotriches	Euplotes, Aspidisca
	Tentaculifères (Acinétiens)		Podophrya
			Acineta

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

RÈGNE ANIMAL Sous-règne II. **Métazoaires**

Embranchement	Classe (exemples)	Sous-Classe (exemples)	Ordre (exemples)	Genre (exemples)
Spongiaires	Éponges calcaires Éponges siliceuses	Demosponges	Tetraxonides	Spongilla
Coelentérés	Hydrozoaires		Hydraires	Hydre
	Scyphozoaires		Méduses	Craspedacusta
	Anthozoaires	Hexacoralliaires	Madréporaires	Coraux
Echinodermes	Echinoides			Oursins
Plathelminthes (vers plats)	Turbellariés	Néoophores	Triclades	Planaire
	Trématodes		Digéniens	Douve, bilharzie
	Cestodes	Eucestodes	Cyclophyllidiens	Tenia
Némertiens	Némertes	Armées	Hoplonémertes	Prostoma
Némathelminthes (vers ronds)	Gastérotriches		Chétonoïdes	Chaetonotus
	Nématodes	Aphasmidaires	Trichinoïdes	Trichine
		Phasmidaires	Tylenchoïdes	Anguillule
			Ascaridoïdes	Ascaris
	Acanthocéphales			Pomphorhynchus
	Gordiacées		Gordiodes	Gordionus
Rotifères	Bdelloïdés		Bdelloïdes	Philodina
	Monogonontes		Ploïmides	Keratella
			Floscullariacées	Hexarthra
Echiuriens	Gephyriens		Echiurinés	Bonellie
Annélides (vers annelés)	Polychètes		Errantes	Nereis
	Clitellates		Oligochètes	Tubifex, Nais
			Hirudinées	Sangsues
Lophophoriens	Bryozoaires	Ectoproctes	Phylactolèmes	Cristatella
	Brachiopodes	Testicardines		
Mollusques	Amphineures			Chiton
	Scaphopodes			
	Gastéropodes	Euthyneures	Pulmonés	Planorbe
	Lamellibranches		Eulamellibranches	Dreissena (moule)
	Céphalopodes	Dibranchiaux	Octopodes	Pieuvre
			Décapodes	Seiche
Arthropodes	Crustacés	Entomostracés	Ostracodes	Cypris
			Copépodes	Cyclops
			Cladocères	Daphnia, Bosmina
		Malacostracés	Isopodes	Asellus, Cloporte
			Amphipodes	Gammarus
			Decapodes	Astacus (Ecrevisse)
	Tardigrades		Eutardigrades	Macrobiotus
	Myriapodes	Diplopodes	Chilognathes	Iule
	Arachnides		Acariens	Hydrachna
	Insectes	Ptérygotes	Diptères	Chironome
Stomochordés	Entéropneustes			
Chordés — Tuniciers	Ascidies			
Chordés — Acraniens				Amphioxus
Chordés — Vertébrés	Cyclostomes			Lamproie
	Chondrichtyens	Elasmobranches	Sélaciens	Requin
	Ostéichtyens	Néoptérygiens	Téléostéens	Truite
	Batraciens		Urodèles	Protée
			Anoures	Grenouille
	Reptiles		Chéloniens	Tortue
	Oiseaux		Anatidés	Canard
	Mammifères	Placentaires	Primates	Homme

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. IDENTIFICATION DES MICRO-ORGANISMES AQUATIQUES

Très pratiquement, ces rudiments d'identification sont regroupés en fonction du rôle joué par les micro-organismes vis-à-vis de l'eau en tant que boisson d'une part et en tant que produit à épurer d'autre part.

3.1. MICRO-ORGANISMES A CONSIDÉRER DANS LA PRODUCTION, LA DISTRIBUTION ET LA CONSOMMATION

3.1.1. Micro-organismes pathogènes

Ces micro-organismes pathogènes rencontrés dans les eaux à potabiliser peuvent être de nature très différentes. Leur identification et leur élimination font donc appel à des techniques variées. On peut classer ces organismes dans les grands groupes suivants: bactéries, virus, champignons, amibes, vers, insectes.

- **Les bactéries**

Les bactéries sont dites pathogènes quand elles sont capables de proliférer dans un organisme pluricellulaire en provoquant, chez ce dernier, des troubles de santé plus ou moins graves. Le caractère pathogène est le propre de certains types de bactéries, toutefois certains germes habituellement dénués de virulence peuvent manifester une certaine pathogénicité quand les conditions de milieu leur sont favorables ou qu'ils pénètrent, par accident, dans une voie biologique inhabituelle (cas par exemple de colibacilles dans le sang).

L'identification des bactéries s'effectue, après isolement, par reviviscence sur des milieux spécifiques par des réactifs chimiques et/ou des réactions de séro-agglutination permettant de mettre en évidence tous les caractères biochimiques cytoplasmiques ou membranaires de la bactérie ainsi que leur virulence (figures 185 et 186).

Le contrôle systématique de la qualité bactériologique des eaux, dont le but est de vérifier l'absence de tous germes pathogènes, procède le plus souvent par voie indirecte en vérifiant l'absence de germes test de contamination fécale (voir page 345).

Néanmoins, des milieux et des réactions spécifiques ont été développés depuis PASTEUR pour mettre en évidence la nature et la virulence de toutes les bactéries pathogènes. Les techniques appliquées sur les eaux dérivent généralement de celles mises au point en milieu hospitalier. La difficulté supplémentaire inhérente au milieu aquatique consiste dans la grande dilution des germes recherchés et dans l'état de stress auquel leur séjour hydrique les a parfois conduits. Leur isolement exige donc des techniques particulières de concentration (membranes filtrantes) et de reviviscence (techniques d'incubation à plusieurs paliers de température).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

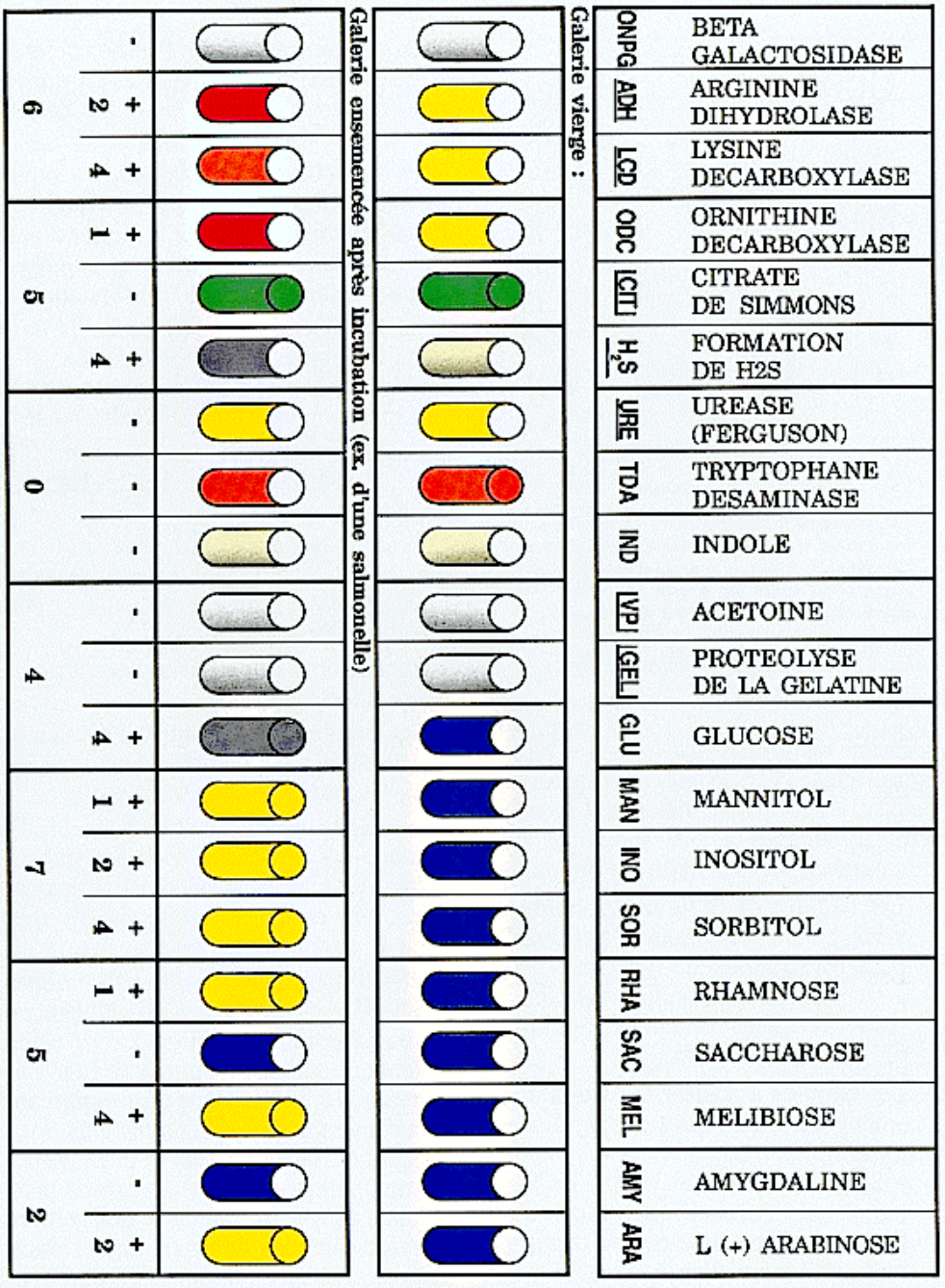


Figure 185. Exemple de galerie d'identification par la mise en évidence de l'équipement enzymatique de la bactérie (d'après la micro-méthode API 20 E).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

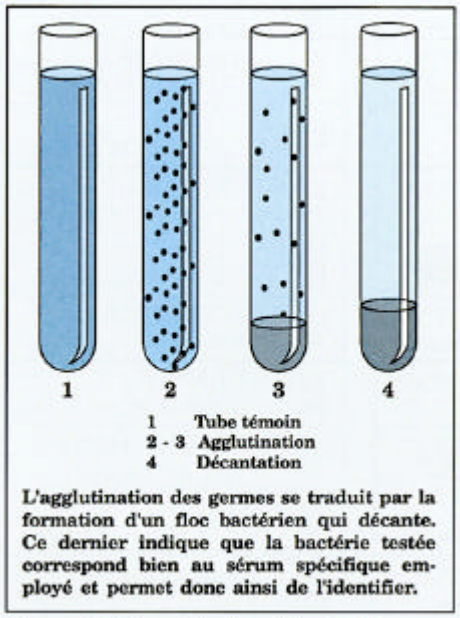


Figure 186. Exemple de galerie de séro-agglutination (images).

Parmi les principales bactéries pathogènes émises vers le milieu récepteur par les porteurs sains ou malades et pouvant être transmises à des individus non immunisés, par voie hydrique on trouve

- **Les bacilles de la fièvre typhoïde :**

- le bacille typhique ou bacille d'Eberth: Salmonella typhosa,

- les bacilles paratyphiques A et B respectivement Salmonella parathyphi, S. schottmuelleri.

- **Les bacilles dysentériques tels que :**

- Shigella dysenteria et Sh. Paradysenterix

- Shigella flexneri ou bacille de Flexner (pseudo-dysentrique). Les affections gastro-intestinales, qui comprennent les Salmonelloses et les Shigelloses, ne sont pas toutes bien caractérisées : il y a beaucoup de cas bénins.

- **Le vibrion cholérique** (Vibrio cholerae ou V. comma), découvert par Loch, qui se présente sous la forme de petits bâtonnets arqués flagellés et mobiles.
- **Pasteurella tularensis** qui provoque la tularémie, maladie qui se transmet habituellement d'homme à homme par les insectes hématophages, mais que l'eau peut également contribuer à répandre.
- **Campylobacter** qui, après avoir surtout été considéré en pathologie animale, représente de nos jours une cause d'entérite aussi importante que les salmonelles. - Proteus morganii qui engendre des diarrhées fétides, surtout chez les enfants, en été.
- **Proteus vulgaris** qui provoque des diarrhées, le catarrhe intestinal (ressemblant un peu à la fièvre typhoïde) et des infections diverses.
- **Escherichia** Coli qui est l'agent de la colibacillose.
- **Le bacille pyocyanique** (Pseudomonas aeruginosa) qui est fréquent dans les eaux d'égouts.
- **Le staphylocoque doré** responsable de nombreuses affections cutanées ou alimentaires (abcès, furonculose, intoxications...) qui est surtout recherché dans les eaux de piscine où sa présence manifeste généralement une insuffisance dans l'évacuation des eaux superficielles.
- **Les Légionnelles** qui ont été révélées en tant que pathogènes humains en 19 76, suite à une épidémie dans un groupe d'anciens légionnaires. Les infections causées par ces bactéries sont de deux types

pneumopathie aiguë ou une forme plus bénigne (fièvre de Pontiac). Ces germes sont susceptibles de se multiplier dans les eaux chaudes (douches, conditionneurs d'air). La contamination se fait généralement par aérosols.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Leptospira** (ou Spirochaeta) icterohaemorragiae qui cause l'ictère hémorragique, très répandu dans le monde. Nombreux porteurs de germes, en particulier le rat sauvage; les égoutiers sont parfois atteints par cette maladie.

Il faut ajouter à côté de ces pathogènes notoires dont les effets cliniques ont été bien étudiés, des germes opportunistes qui peuvent présenter une virulence notamment vis-à-vis d'organismes sousimmunisés. Ce sont par exemple des bactéries appartenant aux groupes des Yersinia ou des Aeromonas.

Ces germes, contrairement aux pathogènes précédemment cités, présentent l'inconvénient d'être adaptés au milieu hydrique. Ils sont, en particulier, capables de se multiplier à des températures voisines de 0 °C et en présence d'un substrat organique dilué, par conséquent dans des conditions proches de celles pouvant être réunies dans un réseau de distribution.

- **Les virus** (figure 187)

Les virus sont des agents pathogènes extrêmement petits, visibles seulement au microscope électronique et qui ne peuvent se multiplier qu'à l'intérieur d'une cellule vivante. Un virus est constitué par l'association d'un acide nucléique et d'une protéine qu'il été possible de séparer chimiquement et même de cristalliser. La réunion de ces deux corps régénère le virus avec toutes ses propriétés biologiques. Lorsqu'une cellule vivante a été attaquée par un virus, elle se transforme bientôt dans sa totalité en un amas granuleux de nouveaux virus prêts à infecter de nouvelles cellules.

On peut trouver dans l'eau les virus suivants

- **Entérovirus**
  - virus de la polyomyélite qui attaque les centres nerveux,
  - virus ECHO (Entéric Cytopathogenic Human Orphan virus), causant une maladie intestinale généralement sans gravité (diarrhée des enfants) ; certains types sérologiques peuvent communiquer des méningites lymphocytaires (réversibles),
  - les Coxsackie A et B, pouvant provoquer des méningites lymphocytaires, des myalgies ou des myocardies. Les agents de gastro-entérites infantiles.
- **virus de l'hépatite infectieuse:** seul le type A est transmissible par l'eau (le type B l'est par les transfusions sanguines). La maladie est endémique dans certaines régions chaudes.
- **Les Adénovirus** qui attaquent les voies respiratoires supérieures et les yeux mais qui sont aussi présents dans l'intestin.
- **Les Rotavirus** qui sont responsables de syndromes diarrhéiques souvent sévères chez le jeune enfant. Ils sont considérés comme responsables de 20 à 70 % des cas de diarrhées infantiles.
- **L'influenza** que les piscines peuvent accidentellement contribuer à transmettre, car ce virus, s'il est rarement constaté dans l'intestin, est très abondant dans le mucus nasal.
- **Les Reo virus** encore mal connus.
- **Le Papillomavirus,** responsable des verrues contractées dans les piscines.

En fait, le rôle de l'eau dans la transmission de certaines maladies virales est très controversé. De plus, si l'on se réfère aux rares cas où l'on a pu attribuer une origine hydrique à des épidémies virales, l'eau avait toujours subi une contamination massive par de l'eau d'égout: il semble que le risque d'épidémie n'existe que dans des conditions extrêmes, mais on tonnait encore mal les doses minimales infectantes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

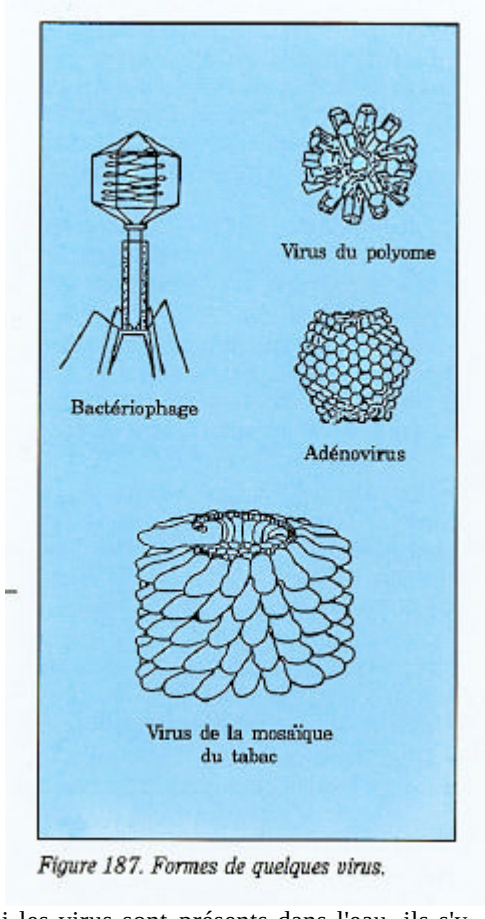


Figure 187. Formes de quelques virus.

Si les virus sont présents dans l'eau, ils s'y trouvent généralement en faible quantité. Il est donc nécessaire de concentrer l'eau à analyser (voir page 346).

- **Les champignons**

Un champignon microscopique infeste parfois les canalisations, l'Histoplasma capsulatum. Il est l'agent de l'histoplasmose.

A part cette observation exceptionnelle, on ne connaît pas d'épidémie d'origine hydrique due à des champignons.

Les amibes

Sous forme de kystes, elles peuvent subsister plus d'un mois dans l'eau. Elles sont toutefois bien éliminées par un traitement à l'ozone avec un résiduel de 0,4 mg.l^{-1} après 4 mn de contact. Deux espèces véhiculées par l'eau ont une implication importante en pathologie humaine: Entamaeba histolytica, agent de dysenteries graves, parfois mortelles (épidémie de Chicago en 1934) ; Naegleria gruberi, agent de méningites à transmission hydrique notamment dans les piscines.

La résistance de ces organismes aux désinfectants, supérieure à celle de la plupart des bactéries, complique leur élimination, mais peut en faire un précieux indice d'efficacité d'une désinfection.

- **Les protozoaires**

Giardia lamblia est responsable de nombreuses gastro-entérites d'origine hydrique de par le monde (4 à 22 % aux Etats-Unis). La dissémination est importante en raison de l'abondance des porteurs sains. Sa résistance aux désinfectants est élevée notamment sous sa forme enkystée. Ils sont bien éliminés par les traitements de floculation à des doses optimisées, suivis d'une filtration rapide sur sable.

- **Les vers**

L'eau peut servir de véhicule à de nombreux vers parasites de l'homme ou des animaux. Ces vers ou leurs neufs ne sont pas détruits par la désinfection aux doses auxquelles elle est habituellement pratiquée; par contre, leurs dimensions sont généralement suffisantes pour qu'une filtration correcte suffise à supprimer pratiquement les risques de contamination. Ces vers poursuivent généralement leur développement chez plusieurs hôtes successifs différents

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Tenia solium** (ver solitaire): oeuf sphérique de 35 µ m forme un kyste chez le porc,

- **Tenia saginata** (ver solitaire): oeuf oval de 2 5 x 3 5 µm, s'enkyste chez le boeuf,

- **Tenia echinococcus** : adulte chez le chien et s'enkyste chez le mouton (kystes hydatiques) ; oeuf de 25 x 35 µm,

- **Bothriocephalus** lattis: adulte chez l'homme. L'oeuf oval, de 45 x 70 µm, se développe dans l'eau, libérant un embryon qui infecte un copépode. Ce dernier étant avalé par un poisson, l'embryon devient larve (8 à 30 mm de long) et se fixe dans les muscles du poisson,

- **Distoma hepatica** : ver plat, adulte chez l'homme ou le mouton. L'oeuf ovoïde de 70 à 130 µm se développe dans l'eau, donnant un embryon cilié qui infecte une limnée à l'intérieur de laquelle il se transforme en cercaire. Celle-ci nage pour se fixer sur une herbe aquatique, avant d'infecter à nouveau un mouton. Se fixe, adulte, dans le foie,

- **Distoma lanceolata** : semblable au précédent, l'hôte intermédiaire étant un planorbe,

- **Bilharzie:** ver trématode, dont le nom de genre est Schistosoma, et provoque une grave maladie, appelée bilharziose ou schistosomase, et surtout répandue dans les régions chaudes du globe. Il existe deux formes de la maladie et trois espèces de ce ver parasite

  - bilharziose vésicale, due à S. haematobium (Égypte, Afrique tropicale, Madagascar),

  - bilharziose intestinale, causée par S. mansoni (Égypte, Afrique tropicale, Madagascar, Amérique du Sud) ou par S. japonicum (Extrême-Orient).

L'adulte vit dans les vaisseaux sanguins de l'homme. L'oeuf est ovoïde (50 x 150 µm) muni d'une pointe de 25 µm. I1 est excrété avec l'urine, se développe dans l'eau en formant un embryon cilié (miracidium) qui infecte un escargot vivant dans les eaux calmes. Il s'y transforme en cercaire (larve à queue fourchue) qui retourne dans l'eau et pénètre dans un nouvel hôte humain en traversant la peau (ou la muqueuse buccale si l'eau est avalée). La durée de vie de la cercaire est de deux jours.

On lutte contre cette épidémie en détruisant l'hôte intermédiaire, c'est-à-dire les mollusques: méthodes chimiques (molluscicides), méthodes biologiques, modification de l'habitat des mollusques.

Dans l'eau potable, les cercaires peuvent être éliminés par une filtration sur sable fin (0,35 mm au maximum) ; mais c'est avant tout l'efficacité de la préchloration et de la désinfection finale (chlore ou ozone) qui garantit en même temps la destruction des cercaires, à condition de respecter des doses et des temps de contact convenables.

- **Ascaris lumbricoïdes** : fréquent dans l'intestin grêle de l'homme et du porc. OEuf ovoïde de 50 x 75 µm. Se développe dans l'eau ou la terre humide formant un embryon de 0,3 mm qui contamine directement l'homme.

- **Oxyures vermiculis** : fréquent chez l'enfant. OEuf ovale avec une face un peu aplatie 20 x 50 µm. Ne parait pas vivre longtemps dans l'eau.

- **Eustrongylus gigas** : infecte les voies urinaires. L'oeuf elliptique (40 x 60 µm), plus clair aux deux pôles, est expulsé par l'urine. L'embryon de 0,25 mm de long infecte un poisson comme hôte intermédiaire.

- **Ankylostoma duodénale** (strongyle): petit ver de 6 à 20 mm de long qui vit dans l'intestin, perce les muqueuses et provoque des hémorragies et diarrhées très persistantes (ankylostomiase ou anémie des mineurs de fond). L'oeuf de

Downloaded from https://hydraulics.blogspot.com/

30 x 60 µm se développe dans l'eau. Il faut une température minimale de 22 °C. L'embryon de 0,2 mm donne une larve capable de traverser la peau pour infecter une nouvelle victime.

- **Filaria medinensis** (dragonneau, ver de Guinée, filaire de Médine). L'animal est vivipare. L'embryon de 0,5 à 1 mm infecte un copépode et forme une larve. Ce copépode, avalé avec l'eau permet à la larve de se développer chez l'homme. Le ver traverse la paroi de l'intestin et forme des abcès sous-cutanés (dracunculose). Le ver adulte mesure de 0,5 à 0,8 m de long et 1 mm de diamètre.

La contamination par passage direct de la larve à travers la peau est également possible.

- **Filaria sanguinis hominis :** ce ver vit dans les vaisseaux des parties inférieures du corps et de la vessie en particulier, et produit des hématuries. La contamination se fait par l'intermédiaire d'un moustique.

- **Anguillula intestinalis** : ver de 2 à 3 mm qui habite le duodénum. L'oeuf se développe dans l'eau, il se forme un ver (anguillula stercoralis) qui pond dans l'eau et les larves qui en résultent peuvent contaminer à nouveau un homme par boisson ou par passage à travers la peau.

- **Les insectes**

Les insectes aquatiques sanitairement dangereux sont essentiellement les moustiques dont la larve vit obligatoirement dans l'eau, et qui sont les agents de transmission de certaines maladies.

La malaria, ou paludisme, est transmise par l'Anophèle (A. maculipennis, funestus ou gambiae), l'agent de la maladie étant l'hématozoaire de Laveran. La fièvre jaune (thyphus amaril) est transmise par AEdes aegypti. Le genre Culex peut également être le vecteur de certaines maladies (encéphalite à virus, filariose).

3.1.2. Micro-organismes saprophytes dont l'eau douce est l'habitat naturel

A côté des micro-organismes précédemment décrits, bien adaptés à vivre aux dépens d'organismes plus complexes, en particulier homéothermes, on peut citer tout un ensemble d'organismes adaptés à la vie aquatique. Ces êtres constituent la flore et la faune des eaux. Ils ont un rôle très bénéfique pour l'équilibre de la nature en tant que détritivores, mais, inversement, leur prolifération sous l'effet d'un enrichissement des eaux en azote et phosphore peut entraîner des nuisances pour les usagers de l'eau: phénomènes allergiques pour les baigneurs, goûts et odeurs désagréables difficiles à éliminer en potabilisation.

Un équilibre complexe régit les biotopes aquatiques où coexistent les consommateurs d'organismes ou de molécules organiques (hétérotrophes) et les producteurs de matières organiques que sont les autotrophes. Les algues et les plantes aquatiques peuvent ériger des masses énormes de substances organiques à partir des éléments simples (C, N, P) par photosynthèse ou par chimiosynthèse.

3.1.2.1. Les bactéries chimiotrophes (voir page 29)

3.1.2.2. Les algues

Elles peuvent être flottantes (plancton) ou accrochées à un support (périphyton). Non seulement elles synthétisent leur propre substance, mais émettent dans le milieu aquatique des médiateurs chimiques (métabolites) qui vont, quand les algues abondent, entraîner des nuisances pour l'eau potable (précurseurs d'halométhane, produits à goûts intenses et variés) (voir tableau 49).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 49. Goûts et odeurs générés par les algues. Tableau extrait de "Identification and Treatment of Tastes and Odors in Drinking water" - J. Mallevialle, Suffet IH, 1987.

Classe d'algues	**Nature des odeurs**		**Nature du goût**	**Sensation**
	Algues en quantités limitées	Algues en quantités importantes		
Cyanophyceae				
Anabaena	herbe, moisi, capucine	pourri, septique, médicinale	-	-
Anabaenopsis	-	herbe		
Aphanizomenon	herbe, moisi, capucine	pourri, septique, médicinale	sucré	sec
Cilindrospermum	herbe	septique	-	-
Gloeotrichia	-	herbe	-	-
Gomphosphaeria	herbe	herbe	sucré	-
Microcystis ou Anacystis	herbe, moisi	pourri, septique, médicinale	sucré	-
Nostoc	moisi	pourri,	-	-
		septique, médicinale	-	-
Oscillatoria	herbe	moisi, épicé	-	-
Rivularia	herbe	moisi	-	-
Chlorophyceae				
Actinastrum	-	herbe, moisi	-	-
Ankistrodesmus	-	herbe, moisi	-	-
Chara	ail, musqué	moisi, ail	-	-
Chlamydomonas	moisi, herbe	poisson, septique, médicinale	sucré	douceâtre, huileux
Chlorella	-	moisi	-	-
Cladophora	-	septique	-	-
Closterium	-	herbe	-	-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 49. (Suite.)

Classe d'algues	**Nature des odeurs**		**Nature du goût**	**Sensation**
	Algues en quantités limitées	Algues en quantités importantes		
Cosmarium	-	herbe	-	-
Dictyosphaerium	herbe, capucine	poisson	-	-
Eudorina	-	poisson	-	-
Gloeocystis	-	pourri, médicinale	-	-
Gonium	-	poisson	-	-
Hydrodictyon	-	pourri, septique	-	-
Nitella	herbe	herbe, pourri	amer	-
Pandorina	-	poisson	-	-
Pediatrum	-	herbe	-	-
Scenedesmus	-	herbe	-	-
Spirogyra	-	herbe	-	-
Staurastrum	-	herbe	-	-
Tribonema	-	poisson	-	-
Ulothrix	-	herbe	-	-
Volvox	poisson	poisson	-	
Bacillariophyceae (diatomées)				
Asterionella	épicé, géranium	poisson	-	-
Cyclotella	herbe, épicé, géranium	poisson	-	-
Diatoma	-	aromatique	-	-
Fragilaria	herbe, épicé, géranium	moisi	-	-
Melosira	herbe, épicé, géranium	moisi	-	douceâtre, huileux

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 49. (Suite.)

Classe d'algues	**Nature des odeurs**		**Nature du goût**	**Sensation**
	Algues en quantités limitées	Algues en quantités importantes		
Meridion	-	épicé	-	-
Pleurosigma	-	poisson	-	-
Stephanodiscus	herbe, épicé, géranium	poisson	-	douceâtre, huileux
Synedra	herbe	moisi, poisson	-	douceâtre, huileux
Tabellaria	herbe, épicé, géranium	poisson	-	douceâtre, huileux
Chrysophyceae				
Dinobryon	violette, poisson	poisson	-	douceâtre, huileux
Mallomonas	violette	poisson	-	-
Synura	concombre, pourri, médicinale, melon musqué	poisson	amer	sec métallique douceâtre
Uroglenopsis	concombre	poisson	-	douceâtre, huileux
Euglenophyceae				
Euglena	-	poisson	sucré	-
Dinophyceae				
Ceratium	poisson	pourri, septique, médicinale	amer	-
Glenodinium	-	poisson	-	douceâtre, huileux
Peridinium	concombre	poisson	-	-
Cryptophyceae				
Cryptotomonas	violette	violette, poisson	sucré	-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Identification des algues planctoniques (ou phytoplancton)

La classification des algues est basée en premier lieu sur les pigments (grands embranchements) puis sur la morphologie, les substances de réserve, l'appareil flagellaire. Elle permet d'ordonner une très grande richesse d'organismes représentant plus de 2 000 genres, nombre d'entre eux comportant plusieurs dizaines de repérage du genre ou du groupe (voir figures 188, 189, 190).

3.1.2.3. Le zooplancton

Le zooplancton des eaux douces est pauvre en genres et en espèces; il est rarement représenté par un grand nombre d'individus dans les fleuves et les rivières, contrairement aux lacs et aux étangs. Il comprend surtout des crustacés, des rotifères et des protozoaires (voir figures 191, 192, 193).

Les animaux du plancton sont transparents. Ils nagent plus ou moins activement et possèdent des appendices leur permettant de se maintenir dans l'eau. Ils s'enfoncent à une profondeur variable suivant l'agitation de l'eau en surface. Il existe également des migrations verticales journalières en relation avec le phototropisme. Leur taille est très variable. Certains embranchements ne comprennent que des individus microscopique (Protozoaires, Rotifères), d'autres, des individus de quelques millimètres (Crustacés). Ils se nourrissent d'algues, de bactéries, de détritus organiques ou bien se dévorent entre eux. Leur pullulation subit des variations saisonnières, en relation avec le développement du phytoplancton et inversement. En effet, des proliférations algales ont été observées en rivière ou en réservoir, suite à la destruction par des toxiques chimiques du zooplancton algivore.

En dehors des trois grands groupes cités plus haut, on en trouve d'autres dont les larves sont planctoniques, les adultes vivant fixés sur un support. Certains peuvent former des groupements d'individus suffisamment importants pour boucher des conduites d'eau non épurée (cas du mollusque Dreissena polymorphe) ou gêner la filtration dans certains ouvrages (Mollusques, Spongiaires, Bryozoaires). Les neufs, kystes ou larves, peuvent traverser les filtres et se développer ultérieurement (vers, nématodes).

3.2. MICRO-ORGANISMES ASSOCIÉS A L'ÉPURATION

3.2.1. Bactéries épuratrices

La boue activée est constituée essentiellement de bactéries et de protozoaires et parfois de champignons, de rotifères et de nématodes.

Les bactéries y constituent le groupement le plus important, responsable principal de l'élimination de la pollution d'une part, et de la formation des flocons d'autre part.

De très nombreuses espèces de bactéries peuvent participer à la formation des boues activées. La nature des composés organiques qui constituent la pollution

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

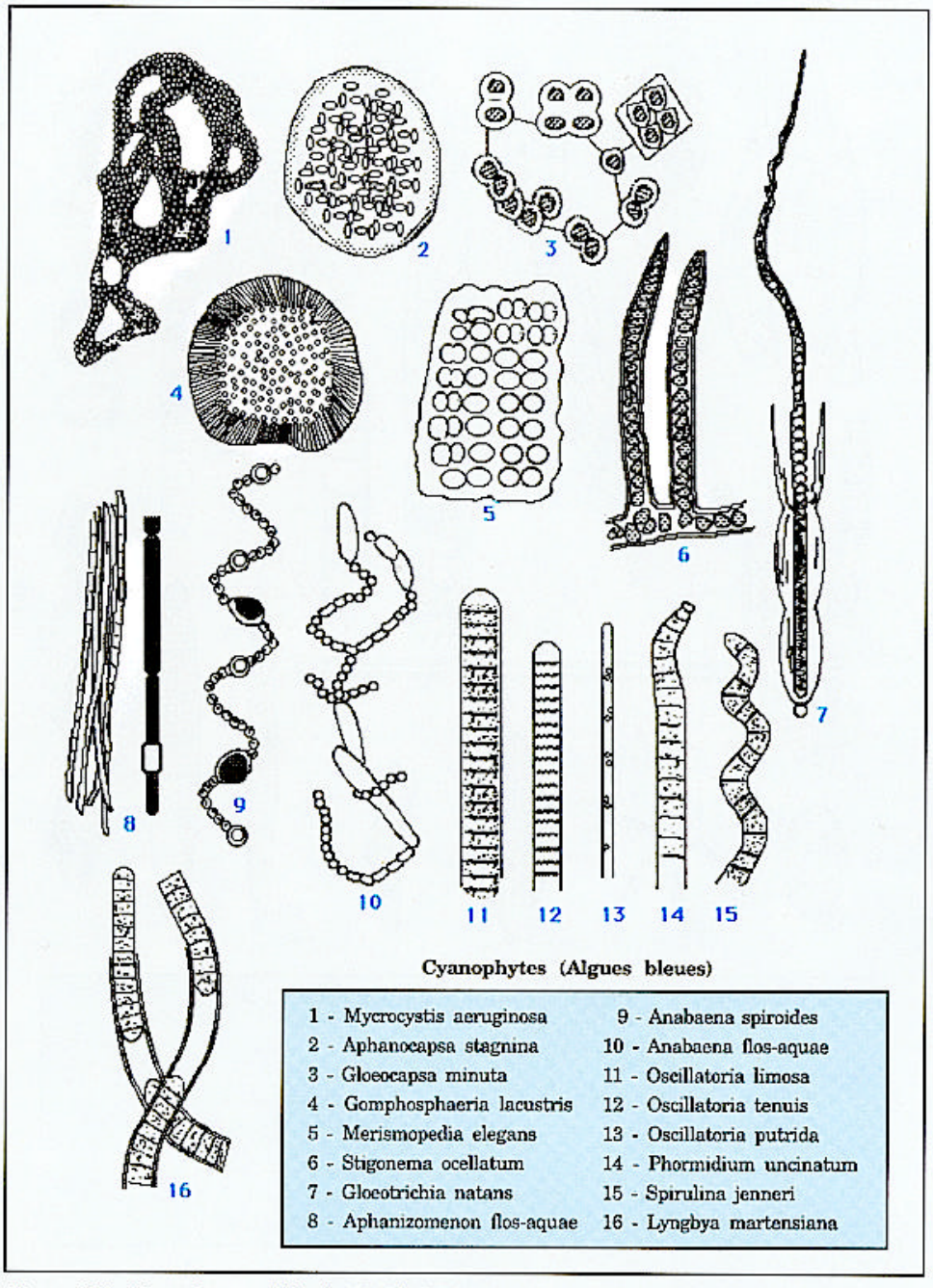


Figure 188. Phytoplancton (d'après V. Sládeček.)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

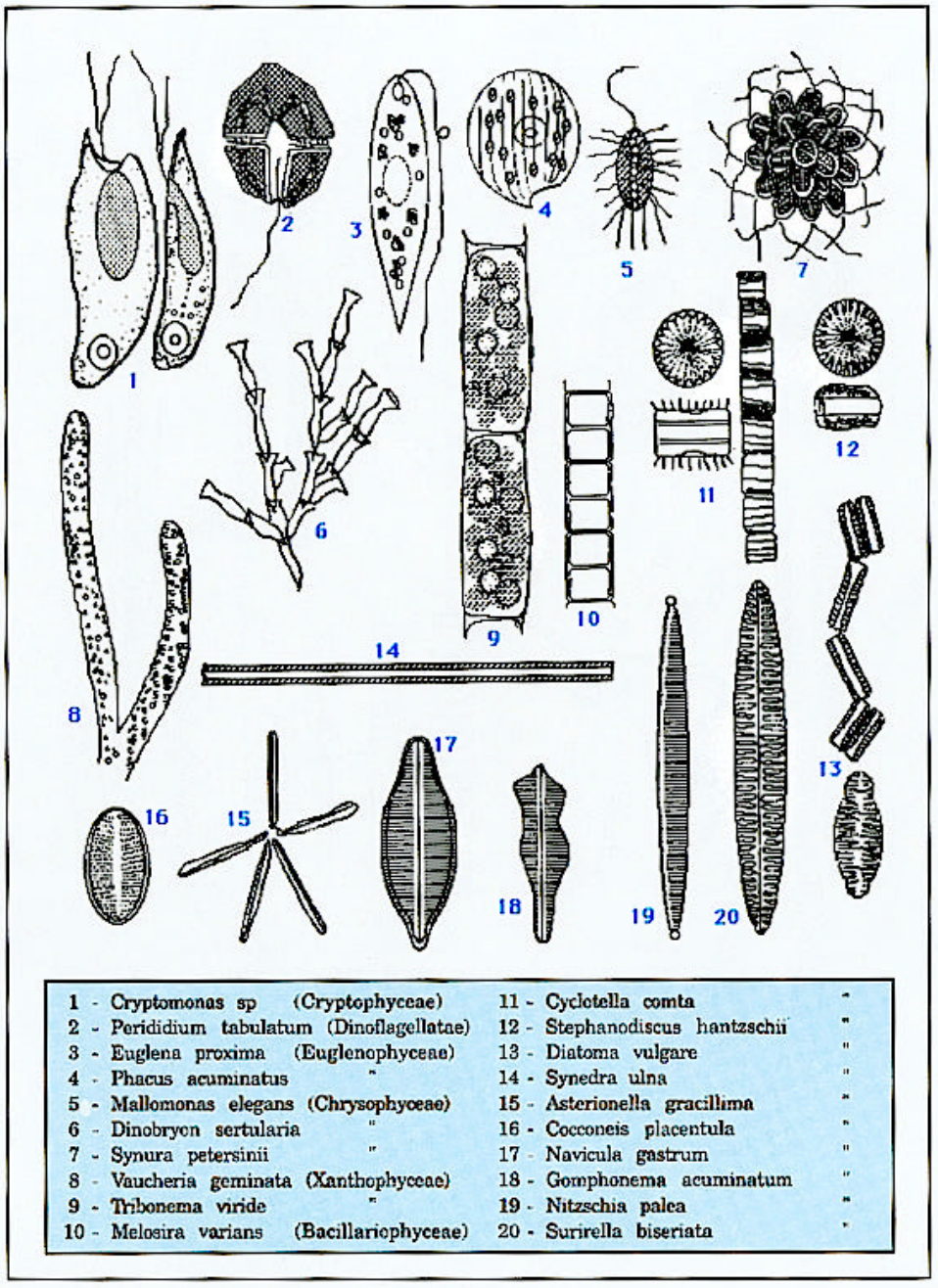


Figure 189. Phytoplancton (d'après V. Sládeček.)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

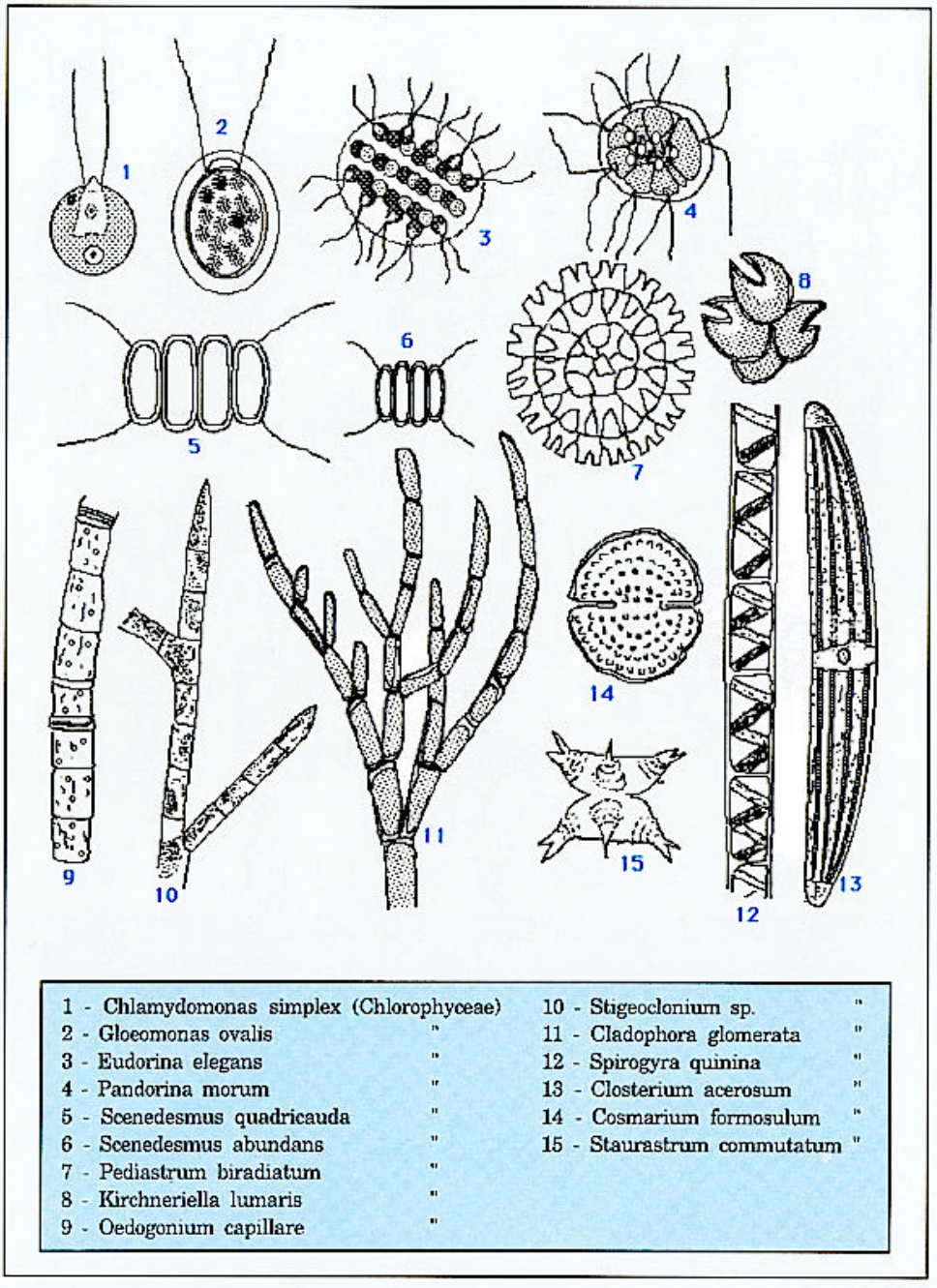


Figure 190. Phytoplancton (d'après V. Sládeček.)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

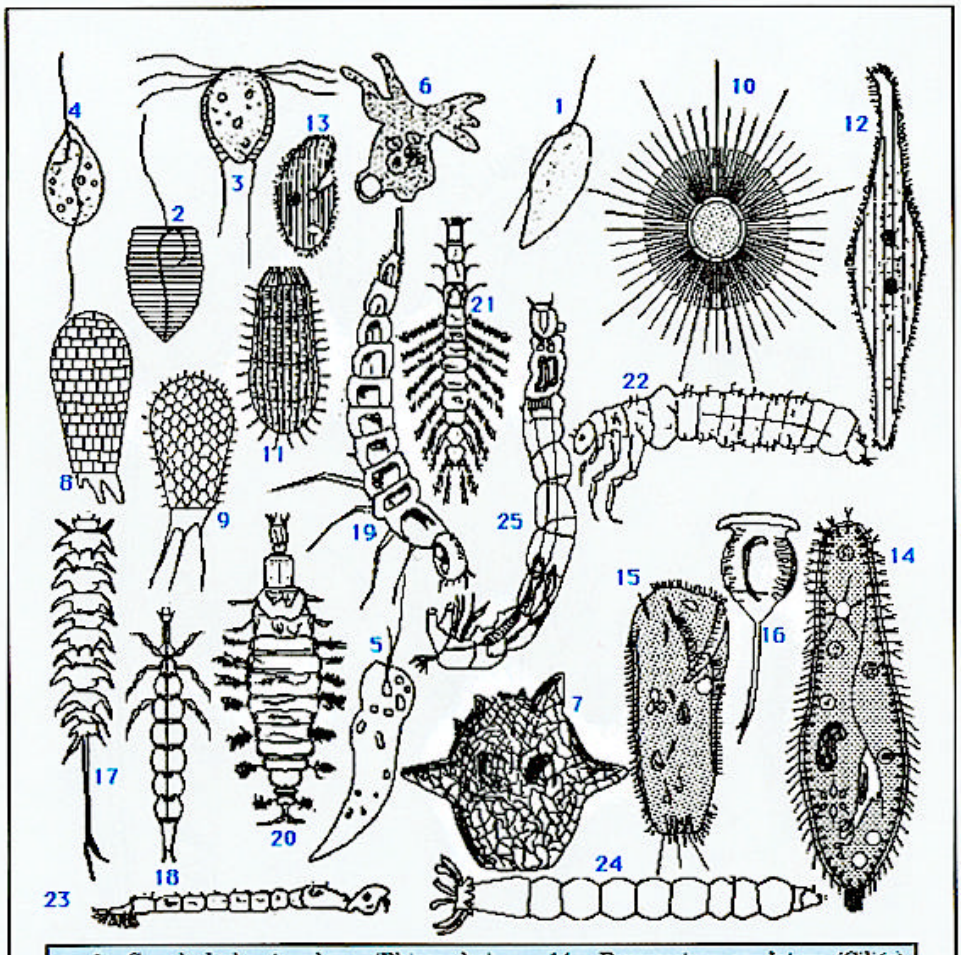
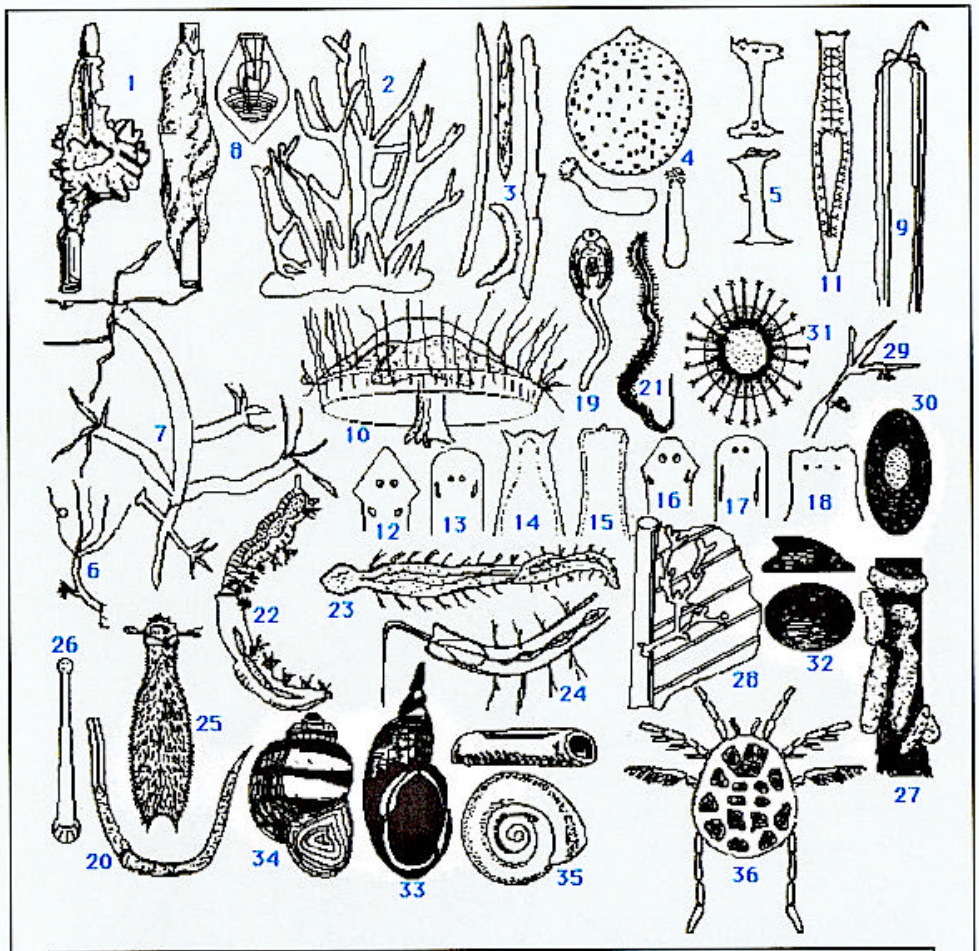


Figure 191. Zooplancton (d'après V. Sládecek.)

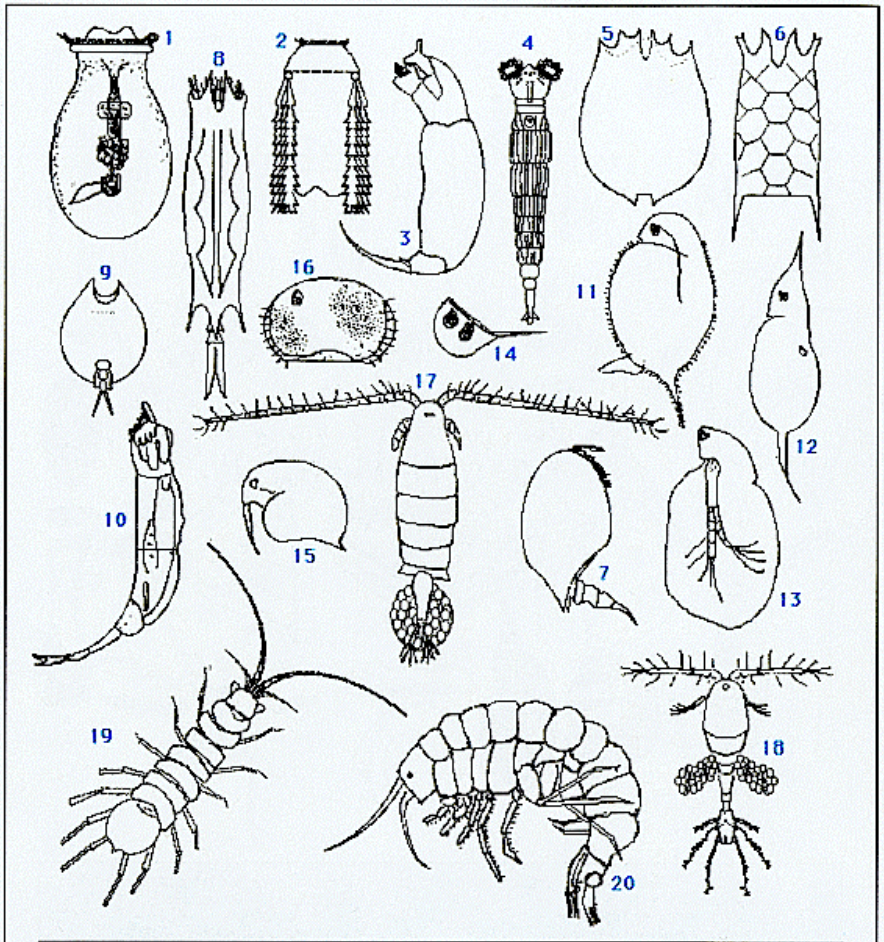
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1	Ephydatia fluviatilis	(Spongiaires)	19	Cercaire-larve de trématode	(Vers)
2	Spongilla lacustris	"	20	Rhabdolaimus aquaticus	"
3	Spongilla lacustris, spicules	"	21	Tubifex tubifex	"
4	Spongilla lacustris, gemmule	"	22	Chaetogaster limnaei	"
5	Ephydatia fluviatilis, amphidisques	"	23	Aelosoma tenebrarum	"
6	Hydra vulgaris	(Cnidaires)	24	Stylaria lacustris	"
7	Hydra sp.	"	25	Chaetogaster maximus	"
8	Hydra attenuata, nématocyste	"	26	Piscicola geometra	"
9	Pelmatohydra oligactis	"	27	Cristatella mucedo	"
10	Craspedacusta sowerbyi	"	28	Plumatella repens	"
11	Crenobia alpina	(Vers)	29	Paludicella articulata	"
12	Dugesia gonocephala	"	30	Plumatella sp. statoblaste	"
13	Planaria torve	"	31	Cristatella mucedo, statoblaste	"
14	Polycelis cornuta	"	32	Ancylus fluviatilis	(Mollusques)
15	Polycelis nigra	"	33	Limnaea stagnalis	"
16	Dugesia lugubris	"	34	Vivipara vivipara	"
17	Planaria polychroa	"	35	Planorbis corneus	"
18	Dendrocœlum lacteum		36	Eylais meridionalis	(Hydracariens)

Figure 192. Zooplancton (d'après V. Sládeček.)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1	Asplanchna priodonta	(Rotifères)	11	Daphnia magna	(Crustacés)
2	Polyarthra vulgaris	"	12	Daphnia cucullata	"
3	Trichocerca capucina	"	13	Simocephalus vetulus	"
4	Rotaria citrina	"	14	Daphnia sp., ephippium	"
5	Brachionus urceolaris	"	15	Bosmina longirostris	"
6	Keratella aculeata	"	16	Cypria ophthalmica	"
7	Colurella bicuspidata	"	17	Diaptomus sp.	"
8	Mytilina spinigera	"	18	Cyclops sp.	"
9	Lepadella patella	"	19	Asellus aquaticus	"
10	Encentrum velox	"	20	Gammarus pulex	"

Figure 193. Zooplancton (d'après V. Sládeček.)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

influe sur la nature du genre dominant ainsi que les conditions du milieu: pH, température, oxygène dissous, etc.

C'est ainsi qu'un rejet riche en matières protéiniques favorise le développement des genres Alcaligènes, Bacillus ou Flavobacterium ; une eau résiduaire riche en glucides ou en hydrocarbures conduit à la prédominance du genre Pseudomonas. La présence de soufre réducteur se répercute par le développement des genres Thiothrix, Microthrix, etc.

On a longtemps pensé que les flots de boue activée étaient constitués par des colonies d'une bactérie particulière baptisée Zooglea ramifiera. En fait, il a été prouvé par la suite que toutes sortes de bactéries peuvent former un élément du flot et que Zooglea ramifiera joue certainement un rôle, mais partiel.

3.2.2. Microflore

Des algues benthiques se développent à la périphérie des installations, des cellules sont entrainées dans les boues et dans les fibres nitrifiantes par abrasion du biofilm. On peut, par exemple, mettre en évidence au microscope des frustules de Diatomées. Toutefois, elles ne jouent pas de rôle en épuration par le procédé des boues activées, contrairement au cas du lagunage.

3.2.3. Microfaune

A côté des bactéries, le groupe le plus important est celui des protozoaires; particulièrement sensibles aux variations des conditions de milieu, ils sont des indicateurs précieux pour l'exploitant car la prédominance de telle ou telle espèce peut renseigner sur le niveau d'adaptation de la boue activée à la nature du substrat, sur la qualité de l'oxygénation, la présence de toxiques, etc. Quant aux rotifères, ils sont des indicateurs d'un système biologique particulièrement stable.

A titre d'exemple, on trouve dans ce qui suit une liste des principaux micro-organismes animaux de la boue activée :

- **Rhizopodes ou Amibes** (figure 194)

Masses protoplasmiques hyalines nues ou incluses dans une coque ou thèque, se déplacent en émettant des pseudopodes qui sont des évaginations du protoplasme. Très résistants à l'anaérobiose, bactériophages exclusifs.

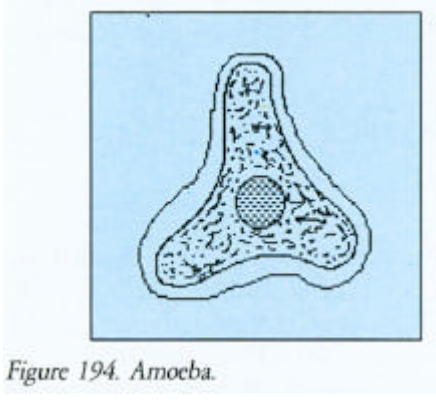


Figure 194. Amoeba.

Les Thécamibes sont des formes abondantes en aération prolongée (figure 195).

Figure 195. Thécamibe

Les amibes libres :

- les petites espèces (< 10 µm) sont abondantes en démarrage de station. On les rencontre également lors de mauvais

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

fonctionnements (anaérobiose ou intoxication de la microfaune),

- les grosses espèces (> 10 µm) sont caractéristiques des boues activées à moyenne, à faible charge et des biomasses fixées

- **Zooflagellés** (figure 196).

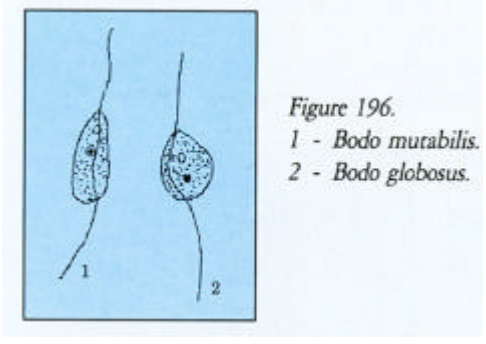


Figure 196.
1 - Bodo mutabilis.
2 - Bodo globosus.

Organismes très mobiles animés par un ou plusieurs flagelles fins et très longs.

Saprophages pour la plupart, ils peuvent résister dans un milieu peu oxygéné pour certaines espèces. Par contre, d'autres espèces (Hexamitus) sont caractéristiques des milieux anaérobies et constituent donc de précieux indicateurs de la teneur en oxygène dissous. D'une façon plus générale, les flagellés réagissent rapidement à la teneur en oxygène et constituent donc un bon indice.

Les zooflagellés forment parfois le seul peuplement évolué des boues adaptées à certaines eaux industrielles contenant des phénols ou des produits de synthèse organique. Premières espèces évoluées apparaissant dans les boues jeunes.

- **Apidisca** (figure 197).

Eucilié de l'ordre des Hypotrichida, famille des Aspidiscidae

Petit cilié à l'aspect d'un crustacé, se déplace assez rapidement à la surface des flocs, grâce à ses cirres frontaux et anaux; "broute" les flocs denses. Ce cilié est très répandu dans les boues activées adultes, en bon équilibre, traitant les eaux de toutes origines. Il est bactériophage exclusif.

est deux fois plus gros et se rencontre dans les mêmes conditions.

Figure 197. Aspidisca.

- **Epistylis** (figure 198).

Eucilié de l'ordre des Peritrichida, famille des Epystilidae.

Cilié attaché formant des grappes denses. Caractéristique des boues activées vieillissantes et relativement bien oxygénées, sans plus. Remplace souvent les vorticelles quand des eaux résiduaires urbaines contiennent une proportion notable de rejets industriels variés (phénols, etc.); bactériophage exclusif.

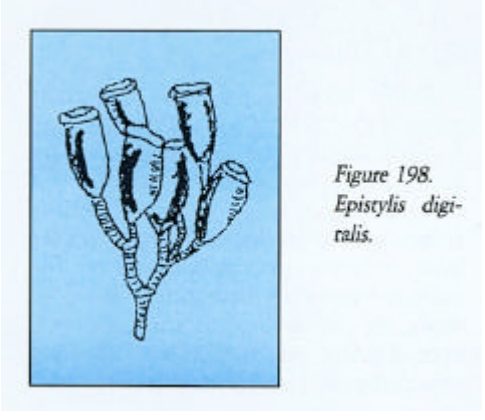


Figure 198. Epistylis digitalis.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Opercularia** (figure 199).

Eucilié de l'ordre des Peritirichida, famille des Epystilidae.

Cilié attaché en grappes lâches au nombre d'individus très variables - bactériographe exclusif.

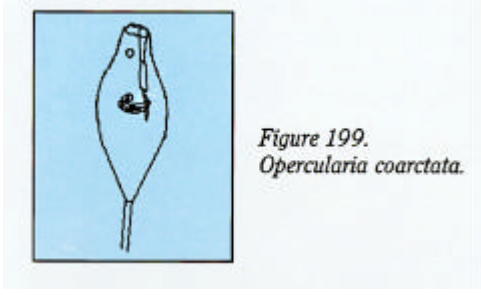


Figure 199. Opercularia coarctata

- **Vorticella** (figure 200).

Eucilié de l'ordre des Peritrichida, famille des Vorticellidae.

Cilié, bactériophage exclusif, attaché, à pédoncule non ramifié. Deux types sont fréquents: l'espèce V. microstoma (à petite bouche) et un ensemble d'espèces à grande bouche. La première forme est associée aux fortes charges, la seconde aux moyennes charges. Ce prédateur, très fréquent, est caractéristique des boues adultes en parfait état, bien oxygénées, dans les appareils fonctionnant à moyenne ou forte charge.

Elles sont pratiquement absentes des faibles charges car leurs prédateurs sont alors favorisés.

La forme nageuse de colonisation, ou télotroche, est abondante quand la population est en expansion.

- **Acineta** (figure 201).

Cilié de l'ordre des Tentaculiferida, famille des Acinetidae.

Organismes fixés sur les flocs, moins fréquents que les vorticelles, prédateurs de micro-organismes libres, bactéries ou protozoaires. Autre genre du même groupe: Podophrya.

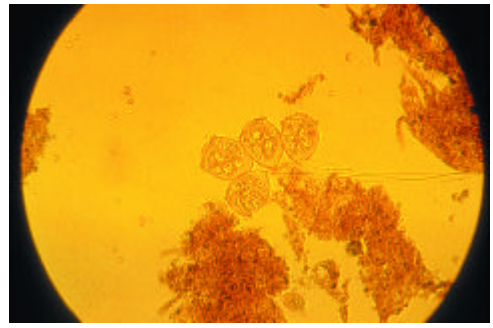


Figure 200. Vorticella.

Figure 201. Acineta.

- **Trachelophyllum** (figure 202).

Eucilié de l'ordre des Holotrichida, famille des Holophrycideae.

Cilié nageur et rampant à la surface des flocs. Ce genre est très fréquent dans les boues en bonne voie de formation juste avant l'apparition des ciliés attachés, pour des installations fonctionnant dans des conditions normales de charge. Demande un bon niveau d'oxygénation (plus de 1 mg.l^{-1} d'oxygène dissous).

- **Paramecium** (figure 203).

Eucilié de l'ordre des olotrichida,famille des Paramecidae.

C'est le cilié type avec une cavité buccale marquée entourée d'un péristome garni d'une ciliation particulière; deux noyaux plus ou moins distincts et deux vacuoles contractiles.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

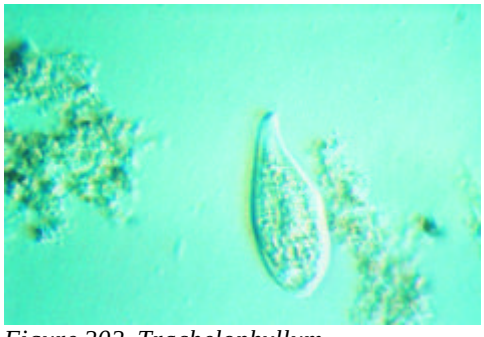
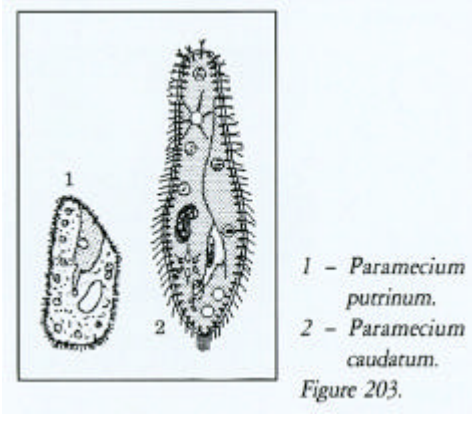


Figure 202. Trachelophyllum.



1 – Paramecium putrinum.
2 – Paramecium caudatum.
Figure 203.

Cet organisme libre, nageur, est une forme assez résistante qui prend le dessus dans les boues mal oxygénées traitant les eaux résiduaires urbaines ou de l'industrie alimentaire.

D'autres espèces moins fréquentes ont des caractéristiques écologiques voisines: par ex. Colpidium.

- **Rotifères** (figure 204 et figure 193).

Organismes pluricellulaires caractérisés par une tête munie d'une couronne de cils et qui, par transparence, laisse voir un certain nombre d'organes tels que ganglion cérébral et organe masticatoire, ou mastax. Le tronc, ou abdomen, comprend un vaste estomac alimenté par l'oesophage, ainsi que les organes génitaux. L'abdomen se termine par une queue où débouche l'anus. Suivant la forme du mastax, ils sont bactériophages exclusifs ou protozoophages. En général, les premiers vivent sur le flot tandis que les seconds, meilleurs nageurs, évoluent au sein du liquide interstitiel.

Assez sensibles aux toxiques et aux variations de charge, ils se développent dans les boues vieillissantes bien floculées et bien oxygénées. Ils sont donc caractéristiques de l'aération prolongée.

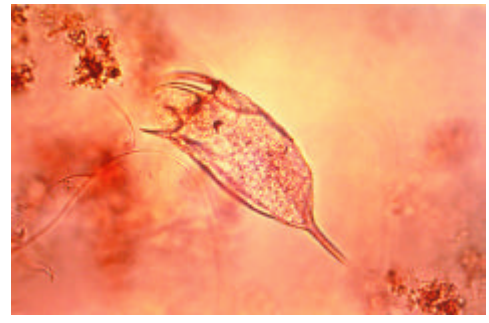


Figure 204. Rotifères

- **Nématodes** (figure 205)

Organismes pluricellulaires vermifor mes recouverts d'une cuticule et comprenant un système digestif bien différencié ainsi que des organes génitaux.

Ces organismes sont caractéristiques des boues vieilles ou en voie de minéralisation. On les trouve fréquemment dans les boues subissant une digestion aérobie, ainsi que dans les filins épais des lits bactériens. Plus résistants que les rotifè res, ils sont souvent le signe de conditions limites à la vie aérobie.

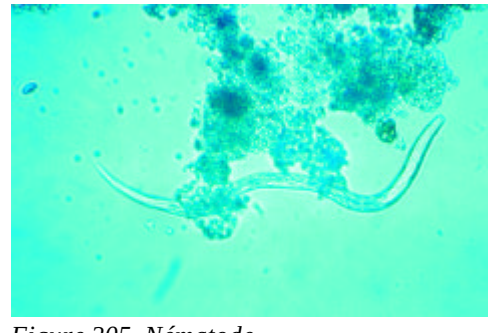


Figure 205. Nématode.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7
ACTION DE L'EAU SUR LES MATÉRIAUX

L'eau, lors de son transport ou de ses utilisations, peut causer aux différents matériaux avec lesquels elle est en contact des altérations de diverses natures dont la plus fréquente est la corrosion des métaux, et particulièrement celle de l'acier. D'autres altéra fions sont possibles par dissolution des matériaux calcaires ou dégradation de béton.

1. MÉCANISME ÉLECTROCHIMIQUE DE LA CORROSION DU FER

L'eau pure attaque toujours le fer car, thermodynamiquement, les deux corps ne présentent aucun domaine commun de stabilité, mais la cinétique du processus, qui est toujours électrochimique, est très différente selon que l'oxygène est absent ou non: au premier cas correspond la corrosion par l'hydrogène.

1.1. PROCESSUS ÉLECTROCHIMIQUE

Tout métal plongé dans une solution d'électrolyte tend à mettre en solution ses ions, qui sont électropositifs, et à rester lui-même chargé négativement Il se forme une électrode dont le potentiel s'exprime dans l'absolu par la relation de Nernst (voir page 206).

Ce potentiel est dit normal quand il est relatif à une solution normale de l'ion considéré et il s'exprime alors par E^0_0 ; d'où la relation générale définissant le potentiel d'électrode d'un métal à 25 °C:

$$E = E_0^\circ + \frac{0{,}058}{n} \log c$$

n : valence de l'ion métallique considéré,
c : activité de l'ion métallique dans la solution.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le tableau 38 du chapitre 3 définit un classement théorique des métaux suivant leur potentiel, les métaux nobles ayant un potentiel positif, les métaux non nobles un potentiel négatif. Les potentiels réels mesurés peuvent être bien différents, car au processus précédent de dissolution du métal peut s'opposer un autre processus qui se déroule sur des plages plus nobles du même métal.

Il crée une différence de potentiel dans le milieu et la production d'un courant électrique qui entretient la réaction de dissolution de l'électrode métallique ou corrosion.

Selon l'absence ou la présence d'oxygène, les processus évoluent très différemment

1.2. CORROSION EN MILIEU DÉSAÉRÉ OU CORROSION PAR L'HYDROGÈNE

Le processus antagoniste est un processus d'électrode gazeuse d'hydrogène, dans lequel l'hydrogène gazeux est formé à puer des ions H^+ présents dans l'eau (figure 206).

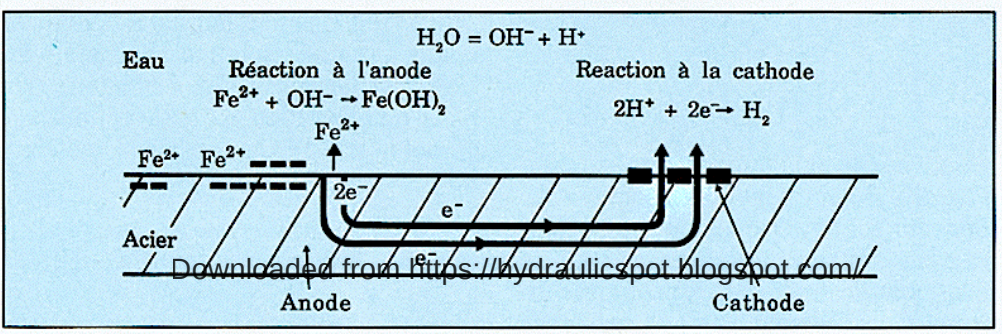
Ce processus capteur d'électrons est susceptible d'entretenir le processus précédent de dissolution du métal, lui-même donneur d'électrons. La corrosion par l'hydrogène, incorrectement appelée corrosion chimique, est donc essentiellement électrochimique. Elle définit deux pôles, l'un électropositif, l'autre électronégatif, arbitrairement appelés cathode et anode et entre lesquels circule un courant électrique.

Il y a dissolution de métal ou oxydation à l'anode alors que la cathode est protégée contre la corrosion. Le potentiel de la cathode d'hydrogène peut s'établir

- sur un métal plus noble que le métal anodique,
- sur une irrégularité de texture cristalline du métal, les zones laminées à froid ou écrouies devenant anodiques par rapport au métal lui-même,
- sur une empreinte étrangère (oxyde, salissure).

La corrosion se développe indéfiniment tant qu'elle n'est pas limitée par l'absence d'ions H^+ aux pH élevés, ou par la saturation du milieu en ions Fe^{2+}, qui entraîne la formation d'un dépôt protecteur par précipitation d'hydroxyde ferreux et arrête, en principe, la corrosion.

Mais l'écoulement de l'électrolyte entraîne le précipité et la corrosion ne peut théoriquement s'arrêter que dans les eaux stagnantes.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 206. Corrosion en milieu désaéré ou par l'hydrogène.

E_{Fe} croit, puisque du fer entre en solution; E_H diminue, puisque H_2 se dégage. Le phénomène doit s'arrêter quand les 2 potentiels sont égaux

$$- 0,44 + 0,029 \log (Fe^{2+}) = - 0,058 \text{ pH}$$

c'est-à-dire

$$\log (Fe^{2+}) = 15,1 - 2 \text{ pH}$$

Il n'y a aucun domaine pratique de stabilité commun au fer et à l'eau en-dessous de pH 10,5, pH auquel la solubilité du fer est 10^{-6} mol.kg^{-1}, valeur correspondant à une corrosion négligeable ; la corrosion se développe d'autant plus que le pH et la concentration en ions Fe" de l'eau sont plus bas. Ce processus en milieu désaéré conduit à un enlèvement du métal.

Morphologiquement donc, la corrosion par l'hydrogène se manifeste sous la forme d'une corrosion assez uniforme du métal, ceci étant dû à la présence d'une infinité de cathodes et d'anodes coexistantes et pouvant même présenter une alternance de pôles. En fait, cette corrosion dite "acide" est moins dangereuse à la neutralité parce que la concentration en H^+ devient insuffisante pour entretenir la réaction cathodique et qu'il peut s'établir une couche protectrice.

Le graphique de Nernst (figure 207) permet de calculer le potentiel d'équilibre de chacune de ces deux électrodes en fonction du pH.

Les horizontales représentent le potentiel de l'électrode de fer, indépendant du pH, pour différentes concentrations de l'eau en ions Fe^{2+}. Cette concentration en Fe^{2+} est limitée par la solubilité de cet ion qui a tendance à précipiter sous forme d'hydroxyde ferreux $Fe(OH)_2$.

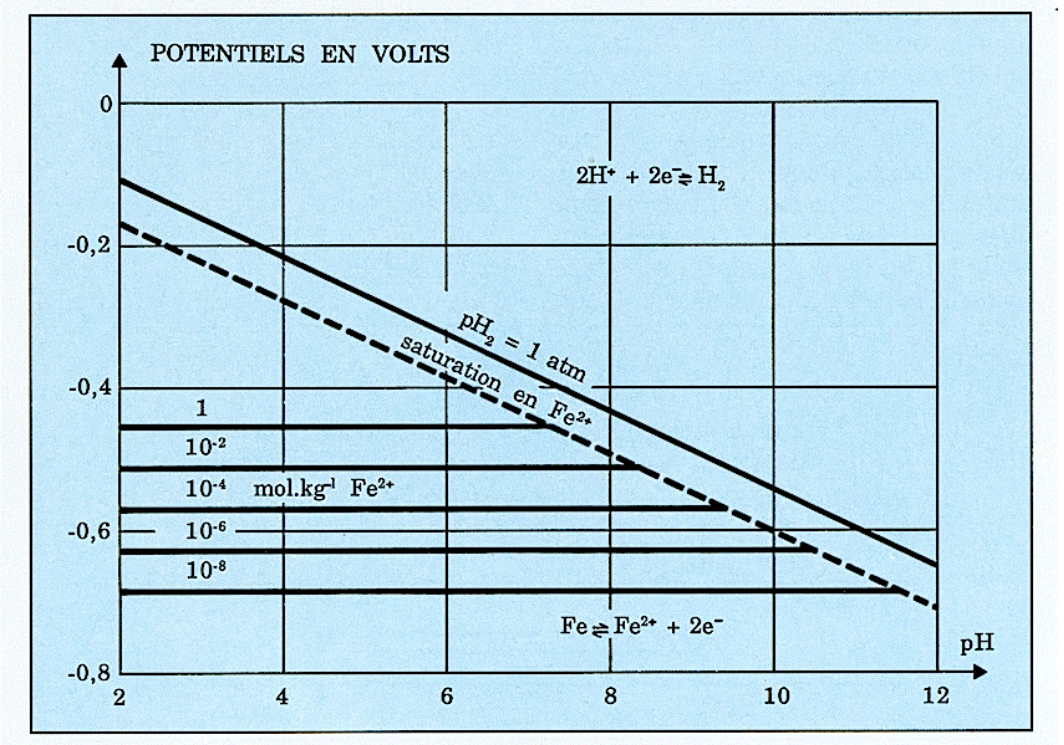


Figure 207. Potentiel d'équilibre fer-eau en l'absence d'oxygène.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.3. CORROSION PAR L'OXYGÈNE

1.3.1. Mécanisme électrochimique

En présence d'une eau aérée, le processus complémentaire d'électrode est, cette fois assuré par l'oxygène présent.

$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

Cette électrode est susceptible d'absorber des électrons, donc de se comporter comme une cathode (figure 208).

Le potentiel d'équilibre est ici fonction :

- de la concentration en ions OH^-, donc du pH,
- de la pression partielle d'oxygène,

$$E' = E_0^\circ - \frac{RT}{F} \ln (OH^-) + \frac{RT}{4F} \ln pO_2$$

Lorsque ce potentiel est supérieur à celui de l'électrode métallique, il entretient la corrosion (figure 209). Ce potentiel étant lui-même supérieur de plus de 1 volt à celui de l'électrode à hydrogène, on comprend que les corrosions par l'oxygène soient plus fréquentes et plus importantes. Plus la concentration en oxygène dissous est élevée, plus le potentiel d'électrode est lui aussi élevé.

On comprend alors l'effet nocif des dépôts de toutes natures qui, en freinant la diffusion d'oxygène vers les surfaces sous-jacentes, y développent une zone anodique.

A la cathode d'oxygène, la libération des ions OH^- augmente le pH de l'eau, du moins à proximité immédiate de la surface métallique. De plus, les ions Fe^{2+} s'oxydent en Fe^{3+}. Or l'hydroxyde ferrique $Fe(OH)_3$ est très peu soluble. Ainsi, au lieu d'être entraînés par l'eau en laissant une surface propre, comme c'est le cas lors d'une corrosion en milieu désaéré, les produits de corrosion s'accumulent autour de l'anode. Ils forment les "pustules" bien connues qui s'opposent encore davantage à la diffusion de l'oxygène et expliquent le caractère perforant des corrosions par oxygène.

1.3.2. Aération différentielle

Du mécanisme précédent, il ressort que les zones du métal exemptes d'oxygène dissous, telles que les creux de filetages, les anfractuosités, les fissures, constituent des plages anodiques, alors que les zones avec présenté d'O_2 dissous constituent des plages cathodiques.

Une différence de potentiel peut également s'établir entre des zones dans lesquelles des gradients de concentration

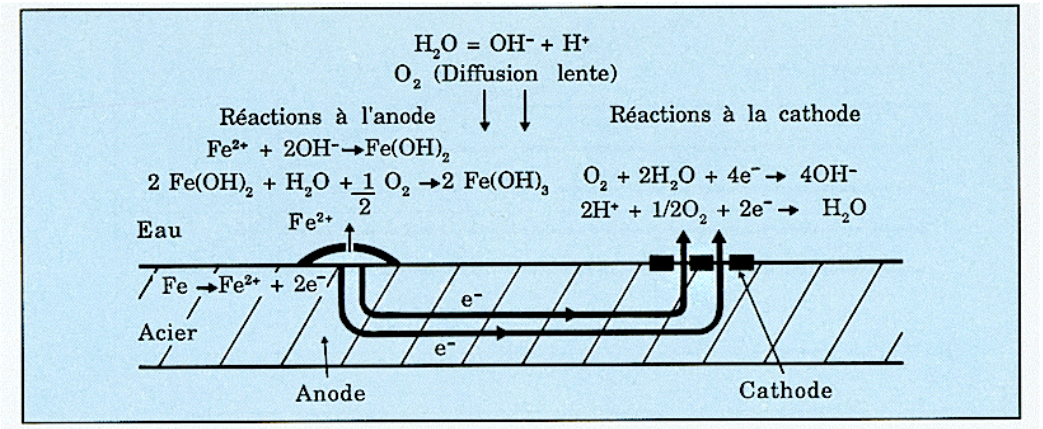


Figure 208. Corrosion en milieu aéré.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

en oxygène dissous existent dans le film liquide. D'où la notion, définie par Evans, qui caractérise la présence d'un grand nombre de micropiles élémentaires constituées par aération différentielle et que l'on peut généraliser à toutes les hétérogénéités des pièces métalliques causées par leur nature, leur construction, leur état de salissure ou par de simples écarts de température.

Le processus de corrosion par aération différentielle est essentiellement régi par la solubilité de l'oxygène et surtout par sa vitesse de diffusion, qui, par sa lenteur, favorise la corrosion.

La vitesse de diffusion de l'oxygène est fonction de la température, de la vitesse de circulation de l'eau et de l'état de surface. Elle a une très grande importance dans le processus d'auto protection.

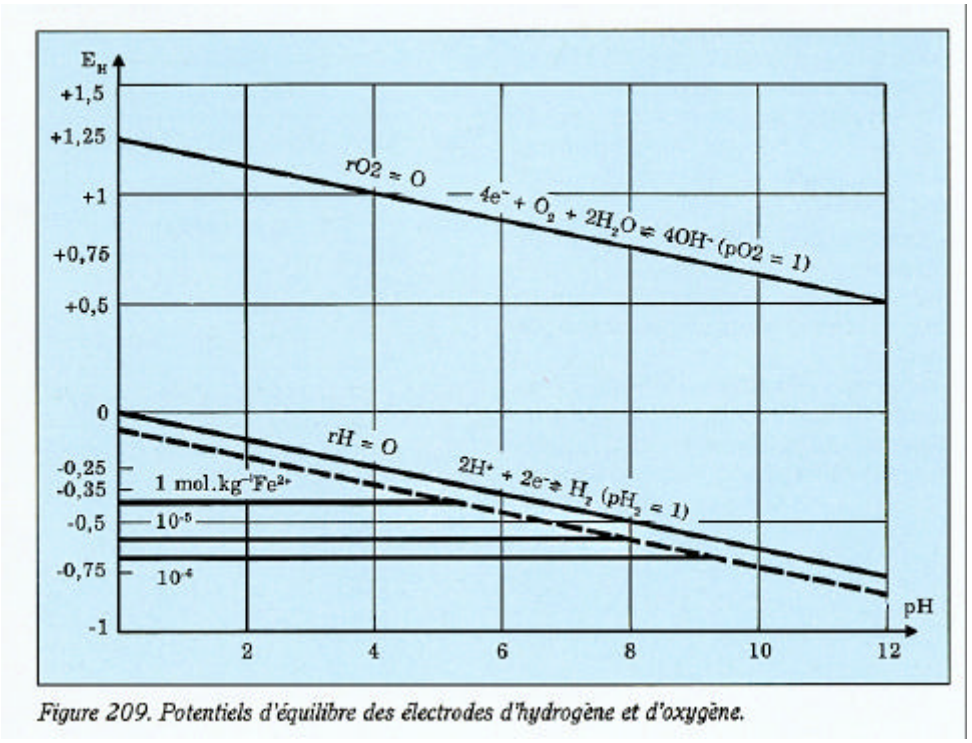


Figure 209. Potentiels d'équilibre des électrodes d'hydrogène et d'oxygène.

1.4. CONTRÔLE ET MESURE DE LA CORROSION

On peut distinguer trois types de dispositifs de mesure

. **Mesure du courant de corrosion** : corrosivimètres.

Les corrosivimètres sont des appareils qui permettent d'appliquer une faible différence de potentiel entre deux électrodes métalliques immergées dans l'eau (polarisation linéaire), de mesurer l'intensité

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

résultante et d'évaluer la vitesse de corrosion. Leur étalonnage rigoureux est délicat On doit surtout leur accorder une signification relative: une augmentation du courant de corrosion indique qu'une perturbation est intervenue. Ce dispositif peut donc être utilisé en contrôle d'exploitation.

. Mesure par éprouvettes

On immerge dans l'eau du circuit à contrôler des coupons de métal que l'on retire périodiquement pour les peser. Le poids de métal disparu, rapporté à l'unité de surface, exprime directement la profondeur moyenne de la corrosion. Le tableau 50 donne les correspondances entre les unités les plus fréquemment employées.

. Examen des matériaux du circuit.

On peut :

- prévoir des manchettes témoins démontables et les examiner périodiquement,
- prélever des sections de tubes sur un réseau ou dans un échangeur et pratiquer des examens en laboratoire, mais le nombre et le choix en sont souvent limités.

Tableau 50. Appréciation de la vitesse de corrosion de l'acier doux. (Tableau de correspondance entre les différentes unités).

Vitesse de corrosion	µm/an	mdd*	mpy*
µm/an	1	0,2	0,04
mdd*	5	1	0,2
mpy*	25	5	1

* mpy : millième de pouce/an ; mdd : $mg/dm^2.j$.

Qualité de la protection			
Excellente	≤ 50	≤ 10	≤ 2
Bonne	50 à 125	10 à 25	2 à 5
Moyenne	125 à 250	25 à 50	5 à 10
Médiocre	≥ 250	≥ 50	≥ 10

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. FORMATION DE COUCHES DE PROTECTION ET PASSIVATION

La corrosion peut être limitée par la formation, spontanée ou provoquée, de couches de protection. Ces couches sont dites naturelles quand elles résultent de l'action des composants de l'eau et de la température. Par contre, l'intervention d'agents extérieurs (produits inhibiteurs ou tension électrique) provoquent dans certaines conditions la formation artificielle d'une couche protectrice par des processus d'inhibition ou de passivation contrôlée.

2.1. FORMATION SPONTANÉE DE COUCHES PROTECTRICES

Il s'agit en fait d'un processus général d'inhibition lié à la présence d'ions OH- et qui se manifeste donc à pH neutre ou alcalin (voir page 262).

En l'absence d'oxygène, et au voisinage de la couche limite, la solubilité des ions Fe^{2+} et le pH peuvent être tout autres qu'au sein de l'eau elle-même, surtout lorsque l'eau est stagnante ou peu agitée.

En se combinant avec les ions Fe^{2+} libérés, les ions OH^- forment de l'hydroxyde ferreux $Fe(OH)_2$ qui précipite en couche plus ou moins homogène sur les zones cathodiques ou anodiques, mais il est fragile et peut subir des transformations importantes qui limitent le caractère protecteur de la couche formée.

2.1.1. Film de Tillmans

Si la diffusion d'oxygène est massive sur les zones cathodiques, l'hydroxyde ferreux non protecteur est oxydé en hydroxyde ferrique qui, lui-même, syncristallise avec du $CaCO_3$ si les eaux sont suffisamment bicarbonatées calciques. Ce processus se déroule dans un domaine de pH de 7.à 8,5 et assure la formation d'une couche mixte protectrice naturelle, dite couche de Tillmans : c'est elle qui assure la protection d'un grand nombre de réseaux de distribution d'eau. En pratique, la couche protectrice se

forme aux trois conditions suivantes

- présence d'oxygène dissous à la dose d'au moins 4 à 5 $mg.l^{-1}$,
- teneur de CO_2 libre correspondant à l'équilibre calco-carbonique,
- alcalinité bicarbonatée calcique de l'eau brute suffisante pour dépasser le produit de solubilité du carbonate de calcium aux cathodes (de l'ordre de 7 à 11 °F).

Pratiquement, on peut prévoir la probabilité de réalisation de cette protection par le calcul de **l'indice de stabilité de RYZNAR.** Cet indice, très utilisé dans le conditionnement des circuits de réfrigération, a été établi par expérimentation sur des eaux bicarbonatées calciques aérées. Il permet de définir empiriquement la tendance à la corrosion ou à l'entartrage d'une eau aérée. Sa définition est la suivante :

$$I_R = 2pH_S - pH$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

où pH, = pH théorique de saturation, calculé d'après le diagramme de Langelier (voir page 263).
pH = pH mesuré à 25 °C.

Le tableau ci-dessous, applicable à des températures comprises entre 0 et 60 °C, indique la correspondance entre les différentes valeurs de l'indice, toujours positif, et les tendances de l'eau.

Indice de RYZNAR	**Tendance**
4 à 5	entartrage important
5 à 6	entartrage faible
6 à 7	équilibre
7 à 7,5	légère corrosivité
7,5 à 8,5	corrosivité importante

2.1.2. Film de magnétite

L'existence de températures supérieures à 100 °C favorise la transformation de l'hydroxyde ferreux en magnétite Fe_3O_4, produit de degré d'oxydation intermédiaire.

$$3Fe(OH)_2 \rightarrow Fe_3O_4 + H_2 + 2H_2O$$

Cette réaction débute à 100 °C et est totalement achevée à 200 °C.

La magnétite forme une couche très résistante qui n'est pas susceptible de se redissoudre à des pH neutres ou même légèrement acides.

Donc dans le cas d'eaux très pures et exemptes d'oxygène

- au-dessous de 200-250 °C : il est nécessaire de maintenir un pH d'autant plus élevé que la température est plus faible (chaudières BP),
- au-dessus de 200-250 °C: il suffit de maintenir le pH mesuré à 25 °C, au-dessus de la neutralité.

2.2. PRINCIPES DES PROTECTIONS ANTICORROSION

En dehors des deux importants cas précédents, l'acier est pratiquement actif dans toutes les eaux et se corrode donc plus ou moins rapidement.

Le diagramme de Pourbaix montre les différentes zones de corrosion, de passivation et d'immunité de l'acier (figure 210). La passivation caractérise l'état du métal recouvert d'un filin protecteur et non corrodé tant du moins qu'une réaction secondaire ne détruit pas ce filin d'épaisseur 20 à 100 Å pour l'acier doux et 10 à 25 Å pour les aciers au chrome.

La prévention de la corrosion peut donc s'établir de plusieurs façons

- en passivant les surfaces par maintien d'un milieu suffisamment oxydant et alcalin. C'est le domaine de la passivation naturelle,
- par l'adjonction d'inhibiteurs dans l'eau,
- par élévation du pH, c'est-à-dire par neutralisation et alcalinisation au-delà de pH 10,5 (cas des eaux de chaudières basse pression et de certaines autres applications),
- par abaissement du potentiel d'électrode, en-deçà de -0,58 V ; c'est la protection cathodique utilisée en protection de tuyauteries enterrées ou d'équipements utilisés en eau de mer,
- par isolation physique (revêtement).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

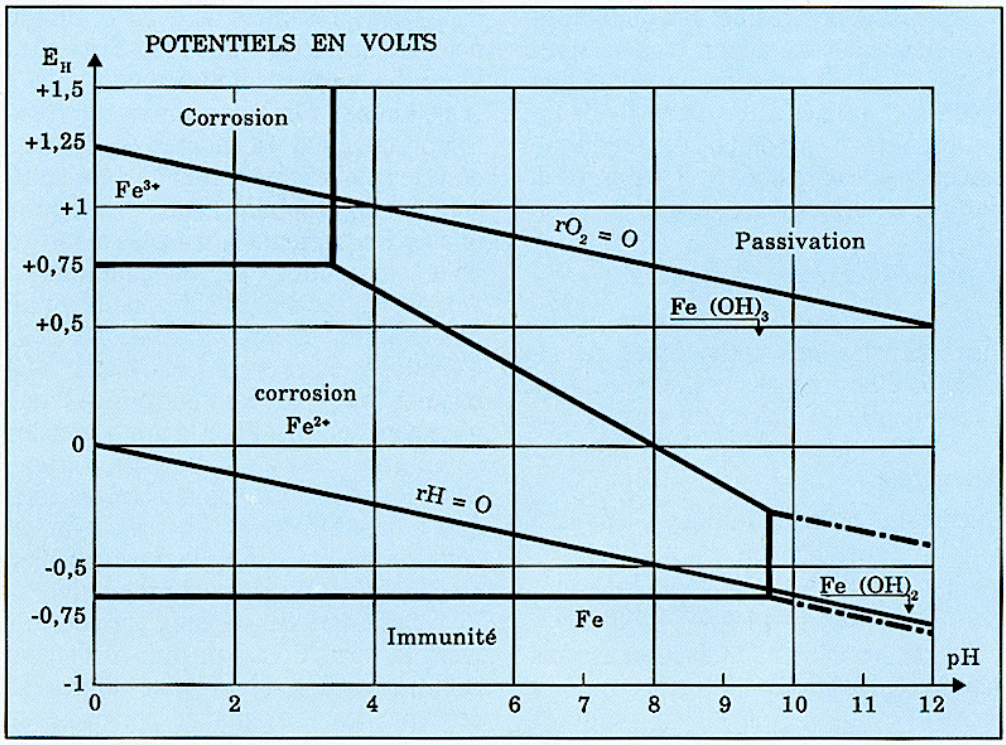


Figure 210. Diagramme de Pourbaix

2.3. INHIBITEURS DE CORROSION

Les produits chimiques susceptibles d'être ajoutés à l'eau pour en supprimer l'effet corrosif vis-à-vis des métaux sont aussi appelés passivants.

Les inhibiteurs de corrosion n'agissent pas sur les composants chimiques de l'eau mais forment, en général, sur les métaux un mince filin protecteur qui, en supprimant le contact métal-eau, évite la corrosion.

Les couches protectrices ne sont jamais totalement insolubles. Après leur formation, un dosage d'entretien est toujours nécessaire si l'on veut éviter leur redissolution.

Une classification des inhibiteurs peut être proposée suivant leur mode d'action bien qu'un même produit puisse intervenir suivant plusieurs processus.

2.3.1. Inhibiteurs anodiques

Ils forment un filin protecteur sur les surfaces anodiques en y bloquant la réaction électrochimique $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$.

Exemples: **chromates** **silicates**
nitrites **borates**
phosphates **benzoates**
molybdates

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tanates et hydrazine assurent aussi partiellement cette action (voir chapitre 25, § 1.2). La protection anodique lorsqu'elle est utilisée seule nécessite de fortes quantités de produit de l'ordre du g.l-1 car, en cas de sous-dosage, il y a risque de corrosion perforante (pitting).

2.3.2. Inhibiteurs cathodiques

Ils forment un film protecteur sur les surfaces alcalines cathodiques par la création d'un composé insoluble dans les zones de pH élevé, bloquant ainsi la réaction électrochimique liée à la présence d'oxygène.

Exemples: **Sels métalliques**, en particulier zinc

Phosphates

Inhibiteurs organiques.

Ils sont, en général, utilisés en association avec d'autres inhibiteurs.

2.3.3. Inhibiteurs mixtes anodiques et cathodiques

Avec le blocage simultané des anodes et cathodes de corrosion, l'effet de "synergie" des ions associés dans les formulations apporte une protection contre la corrosion supérieure à la somme des actions élémentaires; ceci permet de réduire très fortement les doses de produits (quelques dizaines de $mg.l^{-1}$ dans les eaux aérées).

Exemples: **Chromates - zinc**

Polyphosphates - zinc

Phosphonates - zinc

Polyphosphates - silicates

2.3.4. Inhibiteurs organiques

L'action de ces composés ayant des groupes "polaires" est liée à la constitution d'une barrière métal-eau par formation d'un filin mono-moléculaire: ces composés présentent une forte affinité pour les surfaces solides sur lesquelles ils sont adsorbés. On distingue

- les amines filmantes, amines grasses comportant 4 à 18 atomes de carbone dans lesquelles une extrémité de la molécule est hydrophile, l'autre est hydrophobe. En s'orientant parallèlement les unes aux autres, perpendiculairement aux parois, les molécules constituent un filin continu et imperméable. La dose d'emploi se situe entre 2 et 20 $g.m^{-3}$. La mise en oeuvre et les contrôles analytiques sont délicats. Pour la protection des circuits de retour de condensats, ces amines filmantes sont recommandées lorsque la quantité de C02 libérée est importante, c'est-à-dire lorsque la consommation d'amine neutralisante est prohibitive.

La constitution des réseaux permet rarement la formation d'un filin réellement continu: on doit alors éviter ce procédé car tous les courants de corrosion se concentreraient sur les surfaces anodiques provoquant ainsi une corrosion de type perforant.

- les dérivés azolés agissant par chimisorption avec transfert de charge entre la molécule organique et les atomes du métal à protéger. Parmi ceux-ci les dérivés azolés inhibiteurs spécifiques des métaux cuivreux tels les mercaptobenzothiazols, benzotriazols et tolyltriazols (plus stables aux chlorations).

2.3.5. Protection des métaux non ferreux: cuivre et aluminium

L'inhibition du cuivre est importante pour limiter, d'une part la corrosion des alliages cuivreux eux-mêmes, d'autre part les pertes galvaniques provoquées par les particules de cuivre en association avec les autres métaux (acier et alu-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

minium en particulier). Les inhibiteurs spécifiques les plus couramment utilisés sont les **dérivés azolés** déjà cités.

L'aluminium est particulièrement sensible à la corrosion électrolytique. Les inhibiteurs de corrosion les plus courants sont les silicates, les phosphates, les organo-azolés (inhibiteurs organiques), les molybdates ou nitrates, en association avec d'autres inhibiteurs.

2.3.6. Inhibiteurs pour réseaux composites - Formulations industrielles

L'action des inhibiteurs de corrosion doit souvent être stabilisée, renforcée ou élargie par l'emploi d'autres produits chimiques du type sels tampon, catalyseurs, dispersants, dérivés azolés. C'est sous cette forme polyvalente que les inhibiteurs de corrosion sont présentés habituellement. DEGRÉMONT a mis au point des formulations spécifiques "COMPLEXES" et "KEMAZUR" permettant de résoudre les problèmes rencontrés en circuits de chaudières et de refroidissement (chapitre 25, § 1.2 et 7.2.2).

De plus, la protection ne repose pas sur la seule mise en œuvre des inhibiteurs de corrosion. Plusieurs paramètres peuvent influer fortement sur l'efficacité du procédé, en particulier: préparation des surfaces, phase de démarrage et suivi, pH, pollutions éventuelles (MES, MO, hydrocarbures...).

L'expert en conditionnement doit savoir faire la synthèse de ces différents éléments.

2.4. PROTECTION CATHODIQUE

Elle consiste à rendre entièrement cathodique une structure métallique qui ne pourra plus être corrodée si un potentiel suffisamment électronégatif est maintenu de façon à polariser entièrement la surface à protéger et à la maintenir dans la zone de passivité. Son utilisation est envisageable

- soit en présence de différents électrolytes (piles de concentration dans des eaux plus ou moins salées, des sols plus ou moins humides),
- soit lorsque plusieurs métaux sont au contact d'un même électrolyte.

Le critère de protection cathodique de l'acier généralement admis correspond à des valeurs de potentiel appliquées (mesurées à l'électrode cuivre-CuS04) comprises entre -0.85 et -1,0 V. La densité de courant est fonction de la surface métallique à protéger

- 60 $mA.m^{-2}$ pour une grille mécanique nue immergée dans l'eau de mer,
- 5 $mA.m^{-2}$ pour une grille mécanique revêtue d'époxy,
- 0,1 $mA.m^{-2}$ pour une conduite revêtue de brai épikote et dans un sol humide peu conducteur.

La réalisation de la protection cathodique est possible suivant deux procédés

- **Emploi d'anodes réactives** ou sacrificielles de magnésium, de zinc ou d'aluminium, métaux plus électronégatifs que l'acier: il y a production d'un courant interne galvanique.

L'emploi d'anodes sacrificielles (voir tableau ci-après) est envisageable avec des structures immergées de géométrie simple ou si des raisons mécaniques limi-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tent l'autre procédé (certains décanteurs raclés).

- **Application d'une force électromotrice externe** et production d'un courant externe électrique. La prise de terre qui constitue l'anode ou "déversoir" est réalisée en matériau inattaquable, en ferrosilicium ou en titane platiné (avec des densités de courant usuelles respectives de 0,1 A.dm-2 et 10 A.dm-2 de surface d'électrode).

Les différences de potentiel mises en œuvre sont de 5 à 10 V en eau douce et 1,5 à 2 V en eau de mer.

Anodes réactives

Anode	Potentiel d'électrode	Consommation massique	Domaine
Mg	1,7 V	10 kg Mg/A.an	Eau saumâtre
Al	0,8 V	4 kg Al/A.an	Eau de mer
Zn	1 V	10 kg Zn/A.an	Eau de mer

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. PARAMÈTRES SECONDAIRES DE LA CORROSION

Équilibre carbonique et teneur en oxygène sont les deux facteurs principaux qui déterminent les conditions de corrosion. D'autres facteurs jouent un rôle dans le processus de corrosion, car ils influent sur la forme et la vitesse de la corrosion. Ce sont: la présence de sels dissous (chlorures principalement), la tempéra tore, l'état de propreté physique des eaux et la présence de micro-organismes.

3.1. INFLUENCE DE LA MINÉRALISATION

La vitesse de corrosion du fer dans une eau déminéralisée très pure en présence d'oxygène est minime, mais la moindre dissolution de sels initie la corrosion, et ceci selon plusieurs voies

. **La minéralisation globale d'une eau** augmente sa conductivité et diminue la résistance au courant de corrosion. Des traces de chlorures ou de sulfates inférieures à 1 mg.l-1 peuvent ainsi initier la corrosion.

Les ions Cl^-, F^-, Br^-,$S0_4^{2-}$, $N0_3^-$ sont stimulateurs de la corrosion. En présence de ces anions, les surtensions sont plus faibles et la dissolution de l'acier exige moins d'énergie. L'adsorption de ces anions sur les plages anodiques faciliterait la migration du fer vers l'interface

elle serait beaucoup plus forte avec les halogénures qu'avec les anions de plus forte masse atomique et/ou valence.

Les ions OH^-, CrO_4^{2-} et SiO_3^{2-} ont, au contraire, tendance à favoriser la formation d'une couche protectrice.

. **L'influence des chlorures,** très connue sur les aciers inoxydables, est en fait aussi très forte sur les aciers doux. Ceci provient de concentrations élevées en ions Cl^- très mobiles et en ions H^+ dans les zones anodiques qui empêchent la précipitation locale d'hydroxyde de fer par formation d'HCI.

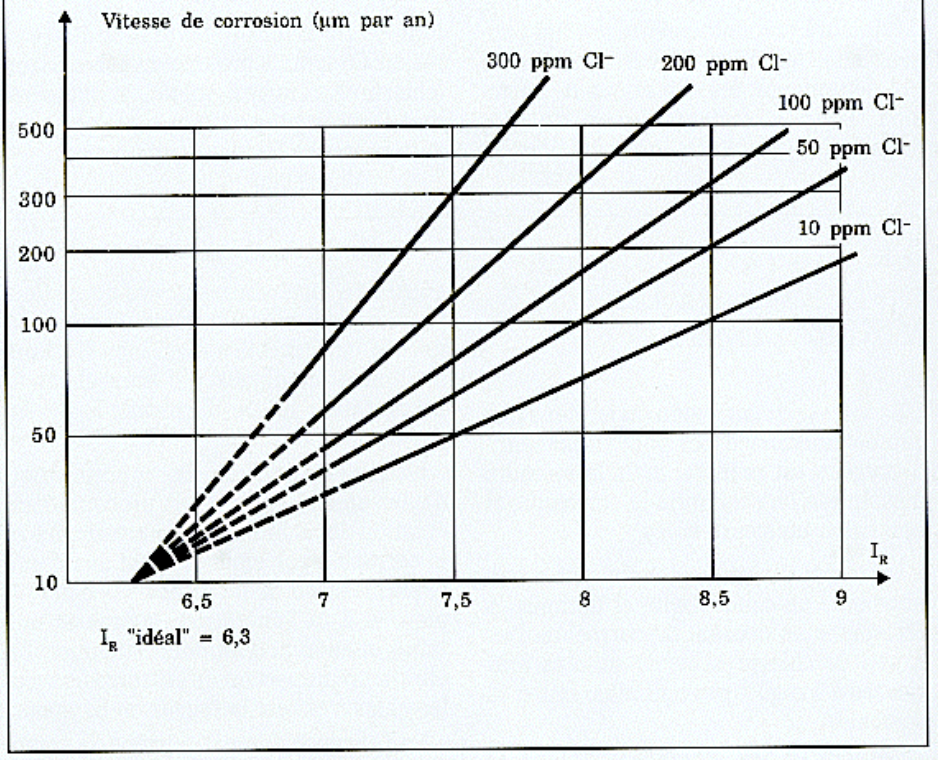
L'augmentation de la concentration d'une eau en Cl^- accroît la probabilité de création d'une infinité de micro-anodes et la corrosion par piqûres; c'est aussi une explication de la formation en ligne de piqûres à la génératrice inférieure des tubes et en aval d'un point singulier. Le paramètre important de la "corrosion par les chlorures" est la teneur en oxygène.

En l'absence totale d'oxygène, la corrosivité d'une eau chlorurée peut être très faible si les conditions de non-agressivité carbonique de l'eau sont réunies (cas fréquent en eau de pleine mer).

En présence d'oxygène, même en assez faible dose, le processus d'aération différentielle intervient et entraîne une corrosivité croissant rapidement avec la teneur en chlorures, ceci même avec des eaux en équilibre carbonique.

Un diagramme expérimental relie la vitesse de corrosion à la concentration en chlorures et à l'indice de RYZNAR pour des eaux aérées (cf figure 211) et pour des températures de l'ordre de 20 °C.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



Analyse de l'eau :
— TAC 15 °F — Température 20 °C
— SO_4^{2-} en concentration équivalente des Cl^-
— Na^+ en concentration équivalente de $Ca^{++} + Mg^{++}$

Figure 211. Vitesse de corrosion d'acier doux en fonction des concentrations en chlorure et de I_R indice de RYZNAR (diagramme de P. MOUCHET).

. **L'influence des sulfates se manifeste de trois façons:**

- directement par accroissement de la conductivité,
- indirectement, par participation au cycle des bactéries sulfato-réductrices et au développement des corrosions bactériennes,
- dans un processus particulier de dégradation du béton (voir page 453).

. **L'influence des ions Cu^2** à des teneurs inférieures au $mg.l^{-1}$ peut provoquer une accélération considérable de la corrosion par électrodéposition de cuivre.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES EAUX AÉRÉES

. Au-dessous de 60 °C

En récipient clos, le chauffage provoque l'instabilité de l'eau, l'entartrage puis la stabilisation calcocarbonique, mais aussi un accroissement simultané de la corrosivité vis-à-vis de l'acier. Le dépôt de $CaCO_3$ peut parfois assurer une certaine protection. Inversement, le refroidissement d'une eau réchauffée et équilibrée par dépôt de $CaCO_3$ la rend, au retour à sa température initiale, agressive et non plus à l'équilibre. Elle est de même plus corrosive, mais cette fois, l'absence de précipitation permet le développement de la corrosion.

Dans un réseau industriel et donc non clos, deux processus se déroulent

- **Effet chimique:** les processus sont les mêmes qu'en vase clos mais l'équilibre peut être déplacé par des évasions de CO_2 donc dans le sens d'un caractère entartrant accru.
- **Effet électrochimique:** la coexistence possible de zones chaudes (où le pH est plus bas) et de zones froides (où le pH est plus haut) détermine des concentrations locales en H^+ qui varient en sens inverse et crée une hétérogénéité de surface avec plages anodiques chaudes et plages cathodiques froides.

Une différence de température de 20 °C peut ainsi entraîner une différence de potentiel de 55 mV. Aux points hauts, la formation de poches de dioxyde de carbone et de filins d'eau de condensation de moindre salinité entraîne la création de zones anodiques.

. Au-dessus de 60 °C

Le dégazage de l'oxygène devient prépondérant et entraîne la formation de couples d'aération différentielle qui s'ajoutent aux couples précédents, avec formation d'un potentiel bien supérieur. Il y a alors corrosion très accrue.

La protection des réseaux d'eau chaude dans les immeubles pose de ce fait des difficultés beaucoup plus grandes que celle des réseaux industriels où les gradients de température sont en général quatre à six fois plus faibles et où les températures moyennes se situent au-dessous de 45 °C (sauf points chauds).

3.3. INFLUENCE DES MICRO-ORGANISMES

La corrosion biologique est en général une manifestation secondaire de la corrosion, associée à l'action de plusieurs familles bactériennes. Elle se caractérise souvent par la formation de concrétions en forme de tubercules très rapprochés qui provoquent des obstructions, quelquefois considérables, et éventuellement des piqûres sous-jacentes qui peuvent devenir perforantes. Ces concrétions sont constituées par des accumulations de ferro-bactéries filamenteuses gainées d'oxyde ferrique partiellement déshydraté et contiennent du carbonate de calcium. L'amas tuberculiforme, feuilleté, est souvent creux à l'intérieur. Il contient en son cœur une masse liquide, quelquefois très noire, qui s'oxyde très vite à l'air

L'addition d'acide fort permet de déceler la présence de sulfure de fer (dégage

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ment de H_2S) et prouver l'existence de d'où la réaction globale bactéries sulfato-réductrices.

. Bactéries du fer

Du type Leptothrix, Crenothrix et Gallionelle, elles vivent en milieu aérobie et puisent leur énergie de synthèse dans la consommation du fer ferreux et son oxydation en fer ferrique (voir page 2 9). Elles accélèrent par la sécrétion d'enzymes cette oxydation qui est lente, appauvrissent le milieu en oxygène et dépolarisent les anodes.

. Bactéries oxydant l'hydrogène naissant

Elles sont du type Hydrogénomonas autotrophes, et tirent de l'oxydation de l'hydrogène cathodique leur énergie de synthèse.

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

Elles ont ainsi une action dépolarisante sur la cathode, favorisant la corrosion.

. Bactéries sulfato-réductrices

Ces bactéries anaérobies facultatives peuvent être présentes dans les circuits de réfrigération. Elles sont autotrophes et favorisent la formation de sulfure d'hydrogène par réduction des sulfates à partir d'hydrogène prélevé aux plages cathodiques (voir page 23).

Les sulfures libérés par la réduction des sulfates précipitent les ions ferreux sous forme de sulfure de fer noir. En pratique, plusieurs réactions se développent:

- dépolarisation de la cathode par les bactéries réductrices

$$SO_4^{2-} + M^{2+} + 8\,H^+ \rightarrow S^{2-} + M^{2+} + 4\,H_2O$$

où M^{2+} représente un métal alcalin ou alcalino-terreux équilibrant l'ion sulfate,

- formation de divers produits de corrosion, en particulier

$$S^{2-} + Fe^{2+} \rightarrow FeS$$

$$3\,Fe^{2+} + 6\,OH^- \rightarrow 3\,Fe(OH)_2$$

D'où la réaction globale :

$$4\,Fe^{2+} + SO4^{2-} + 2\,H^+ + 2\,H_2O \rightarrow 3Fe(OH)_2 + FeS$$

Il est important de remarquer qu'avec des eaux peu chargées en MO la corrosion biologique demeure toujours postérieure à une corrosion électrochimique qu'elle ne fait qu'accélérer par la consommation d'hydrogène.

. Conditions favorables à cette corrosion biologique

- milieu anaérobie,
- pH de 5,5 à 8,5,
- présence de substances minérales (SO_4^{2-}, PO_4^{2-} et Fe^{2+}) et organiques,
- température optimale de développement de 30 à 40 °C.

La consommation d'oxygène à la surface des tubercules entraîne une diminution de la diffusion de ce gaz vers l'intérieur du tubercule qui passe à un état croissant d'anaérobiose, ce qui favorise le développement des bactéries réductrices. La formation de sulfures entraîne non seulement la précipitation de sulfures de fer, mais aussi la réduction de l'hydroxyde ferrique.

$$2Fe(OH)_3+3H_2S \rightarrow 2FeS+S+6H_2O$$

Il y a contraction du volume de l'intérieur du tubercule par transformation de l'hydroxyde ferrique gainé en sulfure de fer plus dense.

. Bactéries oxydantes (thiobacillus oxidans)

Inversement dans l'eau aérée du circuit, ces bactéries (voir page 28) peuvent engendrer une acidification sulfurique et entretenir le cycle de la corrosion bactérienne.

. Bactéries nitrifiantes

En présence de NH_4 dans les eaux usées (voir page 27) ces bactéries peuvent développer une nitrification acidifiante.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.4. INFLUENCE DE L'ÉTAT DE SURFACE ET DE LA PROPRETÉ DES EAUX

La présence de dépôts, pré-existants dans un réseau ancien et encrassé ou provenant du transfert d'eaux mal filtrées, peut être source de corrosion pour deux raisons

- création de zones sous dépôt, non aérées et génératrices de plages anodiques,
- plages de développement de souches bactériennes diverses et de réactions réductrices dépassivantes.

Les aciers inoxydables sont particulièrement sensibles à ce processus.

3.5. INFLUENCE DE LA VITESSE DE CIRCULATION

Ce paramètre extrêmement important intervient dans des processus complexes à la fois physiques et électrochimiques. Trois types de détérioration peuvent être rencontrés:

- **cavitation,** due à des pressions locales situées de part et d'autre de la tension de vapeur de l'eau qui provoquent successivement la libération de bulles de vapeur, puis leur destruction par implosion à des pressions extrêmement élevées; d'où une destruction hétérogène et caverneuse du métal,
- **érosion-abrasion,** due à l'énergie cinétique de particules de sable ou d'autres matériaux contenus dans l'eau qui détruisent en continu la couche protectrice et entraînent une abrasion régulière et homogène du métal. Le processus, selon HOMIG, est simultanément mécanique et électrochimique,
- **érosion-corrosion,** due uniquement à la perturbation de la formation de la couche continue en fonction de la diffusion d'oxygène qui dépend elle-même de la vitesse de circulation de l'eau. Le mécanisme est uniquement électrochimique.

3.6. INFLUENCE DU pH EN EAU AÉRÉE

La solubilité du Fe" diminue considérablement lorsque le pH augmente et il en résulte la formation d'un film isolant d'hydroxyde ferreux (et d'autres oxydes déjà cités) ; ceci se traduit par un accroissement prépondérant des surfaces cathodiques et la réduction des plages anodiques à des éléments de surface ponctuels.

La densité du courant électrique de corrosion est d'autant plus forte sur ces plages anodiques que leur surface est plus faible. Le risque de corrosion perforante ou par piqûres en **présence d'oxygène** est d'autant plus fort que le pH s'approche de 10 ; au-delà, le processus de corrosion diminue; il s'arrête à pH 10,5 pour la plupart des eaux (figure 212). C'est ainsi que des nombreuses corrosions localisées ont été rencontrées en présence d'eaux décarbonatées dont le pH était compris entre 9 et 10 et dont l'alcalinité n'était

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

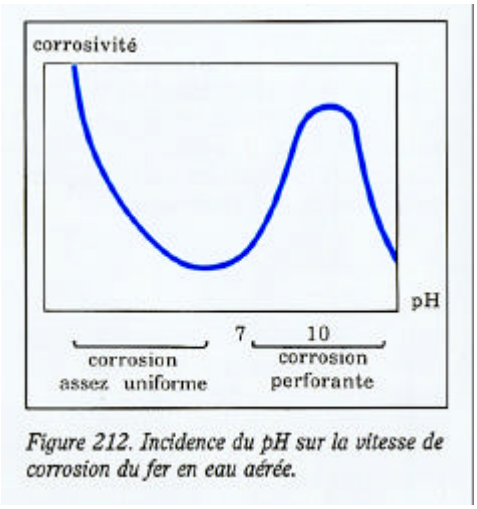


Figure 212. Incidence du pH sur la vitesse de corrosion du fer en eau aérée.

Figure 213. Éprouvette corrodée par une eau décarbonatée.

3.7. INFLUENCE DES OXYDANTS

3.7.1. Oxygène dissous

Son importance dans la définition du potentiel d'électrode a déjà été précisée mais son comportement d'agent double de la corrosion doit aussi être rappelé

- pour des concentrations croissantes de 1 à 4-6 $mg.l^{-1}$, la corrosivité des eaux moyennement minéralisées croit de façon presque linéaire, mais à la saturation, un équilibre s'établit et intervient la formation d'un film mixte protecteur si les présences d'alcalinité et de calcium sont suffisantes,
- de même, en deçà de 1 $mg.l^{-1}$, et pour des eaux douces, mais relativement neutres, un état passif de l'acier peut s'établir.

L'ozone, composé très fugace, ne peut avoir d'action directe dans les réseaux de distribution mais, indirectement, une sursaturation en oxygène peut lui être associée, qui quelquefois favorise des dégazages et engendre des corrosions localisées par aération différentielle auxquelles il peut être remédié.

3.7.2. Oxydants

Selon les concentrations, la présence d'oxydants puissants tels que le chlore et NaOCl peut accroître sensiblement le potentiel redox des eaux aérées. Les aciers inox seront les plus sensibles et des nuances présentant des potentiels de piqûres plus élevés peuvent devenir nécessaires. En eau de mer toutefois, en-dessous de 30 °C l'expérience montre qu'en deçà de 1 à 2 $mg.l^{-1}$ Cl_2 libre, on ne subit pas d'aggravation des piqûres qui deviendraient graves si l'on atteignait 5 $mg.l^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES

4.1. DÉFINITIONS

Par convention, on appelle acier inoxydable un alliage fer-chrome dont la teneur en chrome est supérieure à 11,5 %. Selon sa structure cristalline, un acier inoxydable est classé en quatre catégories dont trois: ferritique, austénitique et austénoferritique, interviennent dans les circuits hydrauliques et le traitement des eaux.

- **Aciers ferritiques :** ils ont une structure cristalline cubique à face centrée et contiennent 16 à 30 % de chrome. Les qualités à forte teneur en chrome présentent une bonne résistance à l'oxydation à haute température, en particulier en présence de H_2S. La stabilisation par le titane qui piège le soufre accroît leur résistance aux piqûres. Les aciers ferritiques à très haut chrome (28 %), ou superferrites sont aussi très résistants.
- **Aciers austénitiques:** ces aciers ont la même structure cristalline mais en plus du chrome en teneur supérieure à 16 %, ils contiennent plus de 6 % de nickel, élément favorisant la cristallisation austénitique. Ce sont, après les ferritiques à haut chrome, les aciers inoxydables présentant la meilleure résistance à la corrosion. Leurs propriétés varient avec leurs teneurs en carbone, chrome et nickel.
- **Aciers austénoferritiques :** l'élévation de la teneur en chrome favorise la structure ferritique (élément alphagène) et l'abaissement de la teneur en nickel, la structure austénitique (élément gammagène) en faisant apparaître dans la structure de ces aciers une certaine quantité de ferrite.

Ces aciers se caractérisent par des caractéristiques mécaniques supérieures à celles des aciers austénitiques et une bonne résistance à la corrosion intergranulaire et sous tension.

Tableau 51. Principaux aciers inoxydables

Désignation suivant normes françaises	**Z6CN 18-09**	**Z2CN 18-10**	**Z6CND 17-12**	**Z2CND 17-13**	**ZICNDU 25-20**	**Z5CNDU 21-08**
Structure	austénitique	austénitique	austénitique	austénitique	austénitique	austénoferritique
Composition en %						
Carbone	< 0,08	< 0,03	< 0,08	< 0,03	< 0,02	< 0,08
Chrome	18à19	18à19	17	17	19à22	20à22
Nickel	9	9à10	11à12	12à13	26à27	6à9
Molybdène			> 2	> à 2,5	4 à 4,8	2 à 3
Cuivre					1 à 2	1 à 2
Chrome équiv en %	18	18	25,75	27,4	35	35
Désignation américaine	AISI 304	AISI 304 L	AISI 316			
Désignation allemande	X5CrNi 18-09	X2CrNi 18-09	X5CrNiMo 18-12	X2CrNiMo 18-12		
Désignation commerciale						
Ugine	NS 21 AS	NS 22 S	NSM 21	NSM 22 S		
Creusot-Loire					Uranus B6	Uranus 50

Remarque: il existe des nuances encore plus riches telles les Hastelloy, Incoloy ou Monel, etc., dont l'utilisation est réservée à des cas spéciaux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2. CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES EN SOLUTION AQUEUSE PASSIVITÉ

Le fer convenablement allié au chrome devient passif dans un grand nombre de milieux. Le caractère inoxydable de l'alliage est alors lié à la stabilité de cette passivation qui correspond à la formation en surface du métal d'une couche mince d'oxyde de chrome. Toute rupture accidentelle de ce filin conduit à des phénomènes de corrosion, sauf en milieu nettement oxydant où le film se reforme de lui-même (passivité stable). L'addition de nickel accroît la résistance à la corrosion dans les milieux peu ou pas du tout oxydants, tandis que le molybdène l'améliore en présence d'acides réducteurs ou d'halogénures (chlorures, bromures, iodures). Il convient toutefois de noter que la corrosion de l'acier inoxydable peut se produire en milieu très oxydant, par exemple dans l'acide nitrique contenant du chrome hexavalent (phénomène dit de **transpassivité).**

Certains éléments ajoutés aux aciers inoxydables permettent d'en élargir le domaine de passivité. C'est ainsi que, par exemple, l'addition de cuivre améliore la résistance à la corrosion par l'acide sulfurique.

4.3. DIFFÉRENTES FORMES DE CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES

4.3.1. Corrosion générale

Comme tous les métaux, les aciers inoxydables peuvent, dans certains cas, être attaqués de manière uniforme sur toute leur surface si le milieu n'est pas suffisamment oxydant. La couche protectrice existant à la surface du métal peut finir par disparaître; ce qui conduit à son attaque généralisée (passivité instable). Par ailleurs, l'état de surface du métal influe sur le caractère de la passivité, le maximum de résistance étant obtenu si les surfaces sont exemptes de contamination par des particules ferreuses ou par des incrustations d'origines diverses.

4.3.2. Corrosions particulières

Avec les aciers inoxydables, on peut rencontrer trois types de corrosions spécifiques

- la **corrosion par piqûre** et la **corrosion caverneuse** qui peuvent intervenir dans les milieux neutres et chlorurés,
- la **corrosion sous contrainte** qui concerne les eaux chaudes.

La corrosion intergranulaire au voisinage des cordons de soudure (appauvrissement local en chrome) qui était particulière aux aciers austénitiques et aussi ferritiques a pratiquement disparu avec trois mesures

- abaissement de la teneur en carbone de l'acier (< 0,03 %) applicable aux seuls austénitiques, de façon à limiter la formation de carbure de chrome,
- utilisation surtout d'aciers stabilisés au titane ferritiques, (type Z8 CT 17) ou austénitiques,
- hypertrempe des seuls aciers austénitiques après le soudage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 52. Paramètres intervenant en corrosion des aciers inoxydables.

Solution	Neutre et chlorurée		Acide et non chlorurée
Type de corrosion	Localisée		Uniforme
	Piqûres	Cavernes	
Cause principale de la dépassivation	O_2 dissous et potentiel de piqûre de l'acier trop faible.	Macro-hétérogénéité de surface, anfractuosités. Circulation insuffisante.	Solutions insuffisamment oxydantes.

4.3.2.1. Corrosion par piqûres (Pitting)

Il peut y avoir, en milieu neutre et chloruré, formation de piqûres localisées, très dispersées, devenant perforantes et très peu visibles. Elles sont davantage dépendantes du potentiel métal-eau (lui-même défini par le type de métal, la température de l'eau, le pH et la concentration en ions Cl^-) que de l'état de surface. Le chlore libre, au-delà de 0,5 $mg.l^{-1}$ élève rapidement ce potentiel de piqûre.

Le métal doit être choisi de façon à ce que son potentiel spécifique de piqûre soit supérieur au potentiel effectif métal-eau pour une concentration donnée en Cl^-.

Les aciers au molybdène à haute teneur en chrome et à basse teneur en carbone résistent le plus souvent bien aux piqûres. Ainsi, un Z2 CND 17-13 résiste aux piqûres par l'eau de mer neutre, propre et froide. Le recours à des alliages plus riches (uranus) sera exceptionnel (au-dessus de 20 °C).

4.3.2.2. Corrosion caverneuse

Celle-ci est rencontrée plus fréquemment et concerne au contraire des zones particulières de la surface du métal qui correspondent soit à une hétérogénéité de construction, soit à un dépôt. Ces zones constituent une anfractuosité ou une plage morte à faible circulation des ions ou des matières. Le développement de la corrosion correspond alors à une acidification lente mais forte de l'eau à partir des ions Cl^-.

Avec une eau aérée pratiquement neutre mais contenant des chlorures, l'hydrolyse des produits primaires de corrosion dans la cellule conduit à la formation d'acide chlorydrique qui, à partir d'une certaine concentration critique, déclenche
le processus de corrosion caverneuse.

La corrosion caverneuse est donc caractérisée par un temps d'incubation qui peut atteindre plusieurs mois, mais, une fois le processus engagé, sa progression peut être particulièrement brutale.

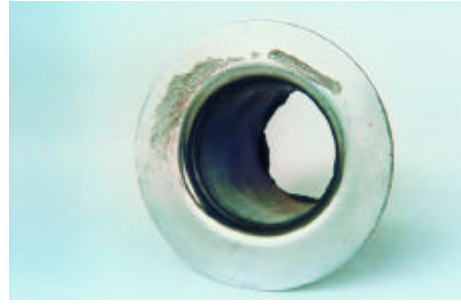


Figure 214. Corrosion d'une bride inox sous un joint défectueux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Si pendant le temps d'incubation les produits de corrosion sont balayés par un brassage de l'eau, le processus est interrompu et le phénomène ne peut se poursuivre qu'en repartant de zéro.

La résistance à cette corrosion peut être estimée à partir de la mesure du pH de dépassivation qui doit être le plus bas possible. Elle est la meilleure avec des austénitiques et les additions de titane et de molybdène, en accroissant le temps d'incubation, augmentent les chances d'interruption du processus. Cependant, une fois la période d'incubation passée et le processus déclenché, sa progression sera généralement aussi rapide dans le cas d'un acier riche en nickel et en molybdène que dans celui d'un acier plus pauvre en ces éléments.

La résistance à ces deux types de corrosion et à la dépassivation locale d'un acier peut être estimée par sa teneur en Cr équivalent (cf. tableau 51)

$$Cr + 3{,}3Mo + 16N$$

4.3.2.3. Corrosion sous contrainte (fissures

La fissuration par corrosion sous contrainte peut apparaître à chaud sur les aciers austénitiques soumis à des contraintes résiduelles provenant du soudage, de l'emboutissage ou bien des conditions de service.

Elle se manifeste en présence de chlorures et, dès 60 °C, les aciers austénitiques doivent être remplacés par des ferritiques ou des austénoferritiques.

4.4. MISE EN OEUVRE DES ACIERS INOXYDABLES

On peut résumer les principes généraux à respecter lors de la mise en couvre des aciers inoxydables.

- **Lors du dessin des appareils**

- éliminer les zones mortes en assurant un écoulement correct du liquide (la possibilité de purge des zones mortes inévitables doit être prévue),
- choisir un rapport surface volume le plus faible possible,
- éviter les raccordements à angles vifs,
- éviter les zones de formage trop sévère, susceptibles de se concentrer en martensite d'écrouissage,
- prévoir la soudure sur les deux faces des assemblages à recouvrement,
- assurer la fixation des supports en acier doux sur la structure en acier inoxydable par l'intermédiaire d'une plaque intercalaire en acier inoxydable, ce qui évite à la soudure une dilution des éléments de l'acier doux dans le métal de la structure,
- adopter des vitesses de circulation élevées.

- **Lors de la construction**

- proscrire le contact avec des métaux ferreux,
- utiliser un procédé de soudage n'affectant pas la résistance à la corrosion de la structure (énergie de soudage limitée),
- dégraisser et décontaminer (élimination des inclusions ferreuses) les pièces après mise en forme ou usinage,
- décaper soigneusement les soudures,
- bien décontaminer et éventuellement parfaire la passivation naturelle par mise en contact avec une solution nitrique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.5. CHOIX D'UN ACIER INOXYDABLE

Le critère de choix d'un acier inoxydable est le plus souvent, sinon toujours, sa résistance à la corrosion et il est difficile d'énoncer des règles précises de choix. Toutefois, on peut formuler les règles suivantes

- utiliser pour les appareils soudés des aciers austénitiques à très basse teneur en carbone ou des aciers stabilisés,
- améliorer la résistance à la corrosion par les chlorures en augmentant les teneurs en Mo ou en Cr,
- ne pas éliminer non plus l'hypothèse du remplacement d'un acier inox: soit par un acier au carbone dans le cas d'échangeurs thermiques, l'eau du circuit étant conditionnée en conséquence; soit, dans le cas de cuves à réactifs, par des revêtements soigneusement choisis et réalisés,
- avec des eaux chlorurées, choisir un acier présentant des pH de dépassivation inférieurs à celui de l'eau.

4.6. INCIDENTS AUX ÉPREUVES HYDRAULIQUES

Dans les installations de traitement d'eau, comme dans l'industrie chimique, de nombreux cas de corrosion d'aciers inoxydables prennent naissance lors des épreuves hydrauliques et entraînent des piqûres perforantes immédiates ou à court terme, après mise en service, pour deux raisons :

- absence de nettoyage à la mise en eau, entraînant des aérations différentielles sous dépôt,
- utilisation d'eaux plus ou moins chlorurées qui se concentrent par évaporation en particulier dans les anfractuosités.

Le conditionnement préventif de ces eaux avec trois à cinq parties de $NaN0_3$ par partie de Cl^-, éventuellement correction de pH au $NaHCO_3$, est utilisé avec succès.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. LE COMPORTEMENT DE LA FONTE

Le comportement de la fonte vis-à-vis de la corrosion par l'eau diffère de celui de l'acier, principalement en raison de la présence des particules de carbone sous forme de paillettes (fontes grises) ou de nodules (fonte ductile). Ces inclusions constituent des plages cathodiques réunies en un squelette carboné qui favorise, en eaux assez dures et aérées, le maintien des produits d'oxydation (surtout avec la fonte grise).

En eaux désaérées ou sulfureuses, par contre, le processus de corrosion dit de **graphitisation** peut s'amplifier par entraînement de ces produits.

La relative uniformité de la corrosion, l'épaisseur des pièces moulées et l'absence des macro-hétérogénéités que seraient les soudures assurent une satisfaisante longévité de ce matériau vis-à-vis d'eaux naturelles ou alcalines aérées, en deçà de 70°C et en justifient de nombreuses utilisations particulières (pompes, robinetterie, ...).

En distribution d'eau, la protection des réseaux est nécessaire à très long terme. Pour **l'intérieur** des tubes, jadis effectuée avec des revêtements simples type vernis bitumineux, elle est maintenant assurée par un revêtement à base de mortier de ciment, éventuellement adaptable aux eaux résiduaires (présence de sulfures), ou quelquefois à base de matériau plastique agréé.

La protection **extérieure** contre la corrosion est constituée par un revêtement bitumineux épais d'une centaine de microns, éventuellement renforcé par la pulvérisation de zinc ou par une protection cathodique par potentiel imposé dans les sols agressifs (selon l'analyse de la corrosivité des sols).

Les tubes en **fonte ductile** dont l'utilisation s'est fortement développée par suite de sa grande résistance mécanique devraient présenter une longévité analogue à celle de la fonte grise malgré leur moindre épaisseur et une vitesse initiale de corrosion plus marquée.

6. CORROSION DES MÉTAUX NON FERREUX

Les problèmes les plus souvent évoqués sont ceux relatifs à des réseaux de distribution d'eau, notamment d'eau chaude sanitaire (ECS). Les notions rappelées ci-après sont en fait élargies aux eaux industrielles de composition pouvant être plus défavorable (pH, salinité, NH_4, ...).

Avant de rappeler les comportements de quelques métaux, alliés ou non, il est important de souligner quatre données générales d'utilisation

- la coexistence trop fréquente de matériaux différents, source de corrosion rapide par macrocouples, est à éviter, surtout avec des eaux agressives (minéralisées ou non). De toute façon, le métal noble (Cu) est à placer en aval d'un métal qui l'est moins,
- des températures trop élevées créent au contact de l'eau des corrosions graves par dégazage et par aération différentielle, en particulier en l'absence de purges de dégazage. Le maintien de l'eau en-deçà de 60 °C évite ce problème,
- toute stagnation d'eau agressive et à tendance acide provoque son appauvrissement en oxygène. Elle peut conduire à la destruction de la couche passivante et libérer en solution des ions métalliques (Pb),
- une eau potable est en général compatible avec ces métaux.

6.1. ALUMINIUM

Avec un potentiel de -1,3 4 V, ce métal très électronégatif, et donc très corrodable théoriquement, acquiert en fait une passivation par oxydation à l'air humide avec formation d'une couche mince protectrice d'alumine. Cette passivation peut aussi être acquise artificiellement par oxydation anodique.

Il est quelquefois employé au contact de l'eau de mer, mais sous la double réserve qu'aucune impureté déposée ne vienne créer de plage cathodique et qu'il soit fait appel à un métal de pureté industrielle très élevée ou à un alliage très approprié (Al + Mg + Mn + Cr).

Des eaux très légèrement acides peuvent être admises, mais le contact avec des eaux alcalines est à interdire.

6.2. CUIVRE

Le cuivre est passivé naturellement dans les eaux aérées par formation d'une fine couche d'oxyde constituée de Cu_2O Sur le cuivre, il peut se produire trois types principaux de corrosion:

6.2.1. Corrosion par piqûres du type 1

Relativement la plus fréquente, elle se rencontre sur tubes recuits en présence d'eaux froides (moins de 40 °C) moyennement ou fortement minéralisées. Elle se manifeste par l'apparition de piqûres régulières, recouvertes d'un dôme d'oxydes verts.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Deux facteurs conditionnent ce type de corrosion

- la qualité de l'eau, par son pH, sa teneur en oxygène résiduel et la teneur en bicarbonates,
- la présence, en surface du tube, de filins carbonés (et à un moindre titre d'oxydes néfastes, tel l'oxyde CuO). Ce dernier facteur tend à disparaître avec l'application de normes qui limitent la quantité de carbone par unité de surface.

6.2.2. Corrosion par piqûres *du type II*

Beaucoup moins fréquente, elle se rencontre en présence d'eaux chaudes à plus de 60 °C et peu minéralisées. Les piqûres sont moins visibles, à la surface interne des tubes, et recouvertes d'un filin le plus souvent à base de sulfate de cuivre.

6.2.3. Corrosion-érosion

Ce type de corrosion est lié essentiellement à des vitesses de circulation excessives, dues à des géométries particulières (coudes, rétrécissements...). Il peut s'agir plus rarement de corrosion aggravée par des particules abrasives. Le faciès obtenu fait apparaître des cratères en forme de fer à cheval (figure 215).

6.2.4. Autres types de corrosion

D'autres types de corrosion peuvent se rencontrer:

- dans les eaux aérées contenant de l'ammonium (eaux industrielles) il peut y avoir une corrosion uniforme importante, par solubilisation de la couche protectrice,
- par exemple la corrosion galvanique entre joint de soudure et l'intérieur du tube, si le joint dépasse lors d'une opération de soudage mal faite, ou encore la corrosion par aération différentielle sous dépôt de silice ou d'oxyde de fer.

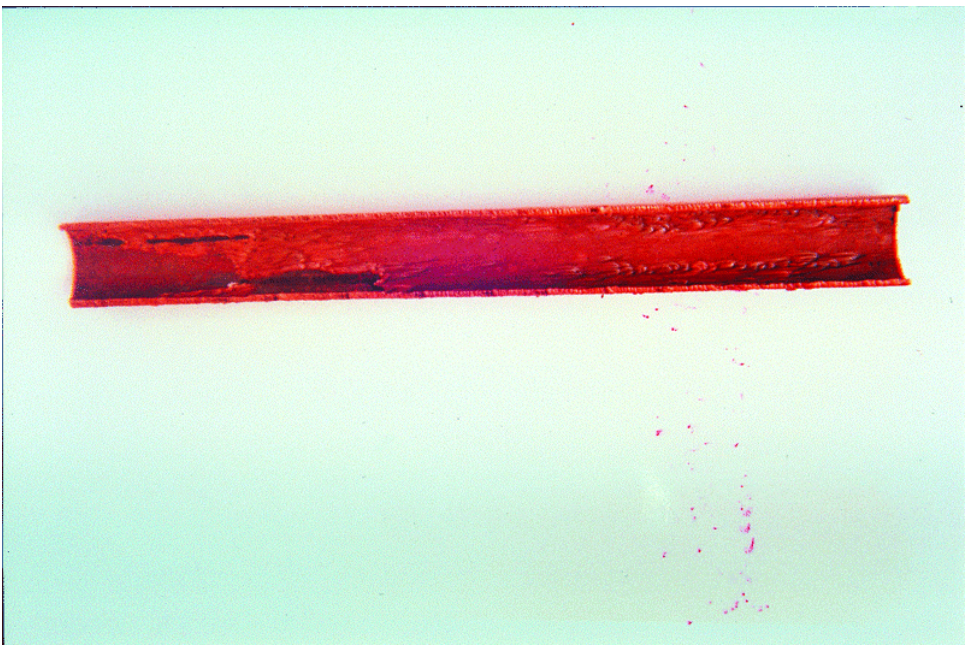


Figure 215. Corrosion et érosion d'un tube de cuivre.

6.3. PLOMB

Downloaded from https://hydraulicsnotblogspot.com/

Les solubilités de l'oxyde PbO et de l'hydroxyde $Pb(OH)_2$ étant relativement fortes, les eaux aérées sont très corrosives et dangereuses, à moins qu'il n'y ait simultanément présence d'une forte alcalinité bicarbonatée (TAC supérieur à 12 °F) et d'une faible concentration en CO_2 libre (pH légèrement alcalin). Dans ce cas, il y a formation d'hydroxycarbonate de plomb, beaucoup moins soluble que

l'hydroxyde et donc protecteur, s'il est plomb pour les usages alimentaires est coprécipité avec du carbonate de calcium. déconseillé et doit être totalement évité Néanmoins, l'emploi des tuyauteries en dans le cas d'eaux douces.

6.4. ACIERS GALVANISÉS

On considère ici les seuls revêtements obtenus par galvanisation à chaud (par trempage dans un bain de zinc à 450 °C ou en continu suivant procédé SENDZIMIR).

Dans ce cas, une couche dite êta (q) de zinc, d'épaisseur variable est fortement accrochée à l'acier et sa surface externe subit une oxydation avec, suivant la température et l'alcalinité de l'eau, formation d'hydroxyde, d'oxyde ou d'hydroxycarbonate de zinc. Ce filin, contrairement à celui des autres métaux, est peu conducteur. Il ne modifie pas le potentiel du métal zinc et n'anoblit pas ce métal. Il agit donc davantage comme un revêtement que comme une couche passivante. Il joue le rôle d'anode soluble s'il y a discontinuité de ce revêtement et apparition d'acier nu.

L'attaque du zinc est ralentie et la diffusion de l'oxygène est freinée; la vitesse de corrosion élevée en eau douce de faible TAC, devient très lente en eau fortement bicarbonatée calcique.

Les chlorures, en concentration suffisante, accroissent le risque de corrosion par piqûres. D'ans la distribution d'eau (ECS), une teneur en Cl^- n'excédant pas 100 $mg.l^{-1}$ peut être préconisée.

Lorsque les eaux sont agressives et que le film protecteur est détruit, le zinc très électronégatif (- 0,776 V) subit lui-même une corrosion accélérée qui s'achève par l'attaque du fer et la formation de rouille.

- **Action de la température.** La vitesse de corrosion croit rapidement avec la température, passe par un maximum (vers 70 °C) et reprend sa valeur initiale à 100 °C. Dès 60 °C, tout l'hydroxyde de zinc serait transformé en oxyde moins adhérent et plus poreux.

La corrosion accélérée ou perforante d'une zone non galvanisée peut survenir. L'hypothèse d'une inversion de polarité de la pile est contestée en faveur d'une diminution de l'intensité du courant de protection cathodique qui deviendrait trop faible.

- **Action du cuivre.** L'apport d'ions Cu^{2+} en solution (cuivre exogène venant du réseau en amont) rend la couche d'oxyde de zinc conductrice et il peut alors y avoir corrosion rapide du fer.

La galvanisation de l'acier ne ralentit donc la corrosion de façon durable qu'avec les eaux non agressives et froides. Le caractère temporaire de la protection qu'elle confère ne doit pas être oublié dans le cas des eaux agressives, et particulièrement de l'eau de mer.

Le tableau 53 donne des conseils de protection pour les réseaux ECS.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 53. Distribution d'ECS. Conseils de protection contre la corrosion.

	Acier galvanisé	Cuivre
Vitesse maximale eau*	< 1,5 $m.s^{-1}$ en colonne < 2 $m.s^{-1}$ en galerie	
Température	< 55 - 60 °C	
TH	>10°F	>5°F
Qualité eau	Légèrement incrustante	pas de NH_4
Teneur en Cl^-	G 100 $mg.l^{-1}$	
Construction		Élément à placer toujours en aval des circuits hétérogènes.
Dégazage	Purges de point haut	

* (Les vitesses en écoulement continu doivent être maintenues à des valeurs très inférieures).

6.5. LAITONS

Ce sont des alliages cuivre-zinc dont les compositions employées peuvent être

Robinetterie	
Décolletage	Cu Zn 37 Pb 3
	Cu Zn 4 Pb 3
Matriçage	Cu Zn 39 Pb 2
Fonderie	Cu Zn 40
Échangeurs tubulaires	
Laiton amirauté	Cu Zn 30 As
	Cu Zn 29 Asl

Le phénomène de dézincification, ou dissolution du zinc avec libération de Cu résiduel, se produit parfois avec des eaux à forte salinité et faible dureté. Il rend le métal poreux et cassant.

Il existe maintenant des laitons non dézincifiables (Cu Zn 35 Pb 2 AS) qui permettent d'éviter cet accident très rare en France.

En présence d'eaux fortement chlorurées ou d'eau de mer, les tubes d'échangeurs peuvent être construits en laiton amirauté (Cu Zn 29), sinon en titane.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7. CAS DE L'EAU DE MER

7.1. CORROSIVITÉ ET ENTARTRAGE

La corrosivité considérable de l'eau de mer varie avec la teneur en oxygène et la température. Les eaux froides de mer du Nord à grande profondeur sont ainsi moins corrosives que les eaux chaudes de surface dans les zones tropicales. La caractérisation de cette corrosivité par l'indice de RYZNAR n'est pas envisageable.

Dans la zone constamment immergée et en eau calme, la corrosion globale de l'acier, régie par la vitesse de transfert de l'oxygène à travers les organismes marins et le filin d'oxydes, est de l'ordre de 100 à 200 microns par an. Dans les tuyauteries et les cuves où règne une circulation d'eau on constate la formation de piqûres dont la progression de 400 à 700 microns/an interdit l'emploi d'acier nu.

Il faut signaler aussi le caractère entartrant de l'eau de mer au-dessus de 60 'C, vis-'a-vis du calcaire ou de matériaux non métalliques: mais la corrosion rapide peut par contre coexister avec l'entartrage dans le cas de contact avec des matériaux métalliques, ferreux ou non ferreux. Les processus électrochimiques de corrosion sont d'autant plus importants que les matériaux métalliques sont plus hétérogènes.

7.2. PROTECTION CONTRE L'ENTARTRAGE

Au-dessous de 90 °C, l'entartrage est dû surtout au bicarbonate de calcium. A partir de 90 °C et au-dessus d'une certaine concentration, on constate en outre la précipitation du sulfate de calcium et de la magnésie.

Le premier problème peut être réglé

- par acidification de l'eau de mer, afin d'en réduire le TAC,
- par séquestration par polyphosphates, l'action de ces derniers se limitant à une température en-deçà de 70 °C (circuits de refroidissement),
- par action dispersante combinée de polyacrylates.

Le second problème, qui concerne en particulier les évaporateurs, doit être résolu par l'élimination partielle du calcium et l'addition de mélanges d'acides phosphoriques et polyacryliques qui ont respectivement une action séquestrante et dispersante (KEMAZUR) et sont stables jusqu'à 130°C (points chauds).

7.3. PROTECTION CONTRE LA CORROSION

7.3.1. Mesures constructives

- Emploi de tuyauteries en béton ou en acier revêtu de brai époxy, de bitume ou de produits bitumeux.
- Construction de têtes d'échanges de cha leur et de boîtes de répartition comportant un revêtement plastique (rilsan ou sécaphène).
- Réalisation d'échangeurs tubulaires en laiton amirauté, ou en laiton 76.22,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

moins sensible à la dézincification, sinon en titane.

7.3.2. Mesures dynamiques

- **Protection cathodique**

- A partir d'anodes réactives en Mg ou en Al parfois employées en présence d'eau de mer (dont la résistivité est faible). Ces anodes assurent une protection de faible puissance et d'effet limité.

- Par application d'une force électromotrice externe. Ce procédé permet la protection de grilles et de tambours de tamisage et celle de grandes longueurs de tuyauteries.

- **Procédés chimiques**

- Protection des faisceaux tubulaires en laiton par l'injection de sulfate ferreux (cf. chapitre 25, § 6.9.1).

- Par inhibiteurs phosphate-zinc dans l'eau qui alimente des faisceaux tubulaires en acier.

- **Élimination de l'oxygène dissous**

- Par désaération sous vide ou strippage au gaz (cf. chapitre 16). Cette méthode est prévue pour les eaux d'injection dans les gisements pétroliers.

- Par réduction chimique au bisulfite de sodium catalysé (voir page 260).

7.4. PROTECTION CONTRE LES SALISSURES ORGANIQUES

Les salissures sont une cause importante de corrosion sous dépôt et de détérioration de la capacité d'échange thermique.

7.4.1. Trois origines

- Mucus organique de bactéries et d'algues.

- Fixation d'organismes mous tels que les ascidies, les anémones de mer.

- Incrustation de colonies d'organismes durs (crustacés, moules, huîtres, balanes) dont la destruction est difficile et qui donnent lieu à des corrosions perforantes sous dépôt par aération différentielle.

Dans les réseaux en alliages cuivreux mais à circulation lente, la dissolution de cuivre est suffisante pour éviter les salissures. Les développements d'algues sont beaucoup mieux maîtrisés que les développements de crustacés grâce aux chlorations.

7.4.2. Incidence des chlorations

L'emploi du chlore contre les salissures peut être une cause complémentaire de corrosivité dont les modalités sont différentes suivant les métaux et suivant les ions présents dans l'eau de mer. Il peut cependant prévenir des corrosions sous dépôt.

L'action du chlore dans l'eau de mer est d'abord liée à la présence de 68 $mg.l^{-1}$ de Br^-. Tout le chlore ajouté déplace le brome suivant deux réactions

$$HOCl + Br^- \rightarrow HO\,Br + Cl^-$$

$$O\,Cl^- + Br^- \rightleftarrows O\,Br^- + Cl^-$$

Au pH de l'eau de mer (8,3 à 7,6) c'est principalement l'acide hypobromeux HOBr qui assure l'action bactéricide et l'oxydation des matières organiques qui peut demander plusieurs minutes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Néanmoins, l'addition de chlore augmente le potentiel redox des eaux de mer aérées à des valeurs critiques dès que celles-ci présentent plus de 0,3 -1 mg.l^{-1} de chlore libre résiduel. Il faut alors choisir des aciers inox à potentiel de piqûre élevé tels que le 316 TI ou mieux le Z2CNDU 17.16 qui présentent des potentiels de piqûre demeurant supérieurs aux potentiels redox des eaux chlorées.

7.5. TENUE DES ALLIAGES CUPRO-NICKEL

Elle peut être affectée par la présence dans l'eau de mer de NH_4, et H_2S.

- **Ammonium**

Au-delà de quelques mg.l^{-1} de NH_4, la corrosion sous crevasse peut se manifester et être supprimée par l'addition de traces de Fe^{2+} ou bien par une chloration à 0,5 mg.l^{-1} qui détruit NH_4 en N.

- **H_2S**.

Des traces de sulfures, dont l'oxydation par l'oxygène dissous est trop lente, entraînent des corrosions sous crevasse qui peuvent être prévenues par une chloration à très faible dose (0,25 mg.l^{-1}). Celle-ci oxyde rapidement les sulfures et réduit la forte corrosivité de ces eaux. Plus généralement, le choix des alliages sera influencé par les vitesses de circulation considérées.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

8. DÉGRADATION DES BÉTONS

Le béton est un matériau constitué de granulats divers et de ciment. Il enrobe éventuellement une armature d'acier.

La corrosion de cette armature n'est à priori possible qu'après dégradation de l'enrobement en raison de l'électropositivité du fer dans le béton armé. En effet, le potentiel du fer dans le béton, dont le pH est voisin de 11,6, est environ de + 100 mV par rapport à l'électrode d'hydrogène. La prévention de la dégradation doit donc d'abord concerner le béton, sauf dans le cas du béton précontraint où les contraintes élevées et la finesse des armatures exposent ces dernières plus fréquemment à la fragilisation sous tension et à la corrosion chimique par les eaux d'infiltration. Les phases de dégradation du béton sont d'abord d'origine mécanique, puis d'ordre chimique.

8.1. CAUSES MÉCANIQUES

Elles sont de trois ordres

- perméabilité trop grande: l'obtention d'une compacité très élevée avec des dosages de ciment de 300 à 400 $kg.m^{-3}$ est, en fait, une condition minimale en présence d'eaux agressives,
- existence de cavernes et de fissures dues à des conditions déficientes d'élaboration et qui peuvent être améliorées en accroissant la plasticité du béton par un dosage eau/ciment inférieur à 0,45 ou l'emploi de plastifiant,
- érosion due à des vitesses de circulation de l'eau dans les conduites supérieures à 4 $m.s^{-1}$ ou à des gradients thermiques trop élevés

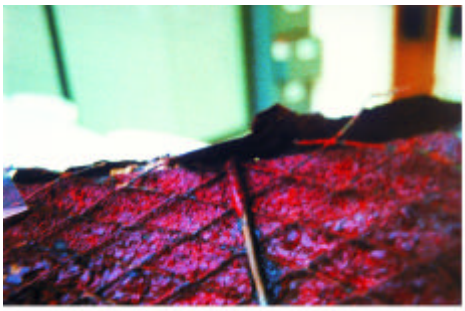


Figure 216. Exemple extrême de tuyauterie .béton corrodée par. l'extérieur.

8.2. CAUSES CHIMIQUES

Elles sont liées à la composition des ciments et à la corrosivité des eaux en contact.

La composition des ciments est à base principalement de silice, de chaux, d'alumine et secondairement de fer, de magnésie et d'alcalins. Elle définit un milieu généralement très basique qui comporte une réserve élevée de sels solubilisables.

Lors de la prise du ciment, du Portland en particulier, il y a libération importante

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de chaux liée, sous forme de $Ca(OH)_2$, et formation d'aluminate tricalcique, de symbole "C_3A".

Selon cette composition des ciments et la nature chimique des eaux, cette solubilisation peut concerner la chaux libre et quelquefois l'alumine. Le tableau ci-après donne les teneurs des constituants principaux de divers ciments.

La dégradation chimique peut se manifester de plusieurs façons

- agressivité carbonique,
- attaque par acidité forte,
- action de l'ammonium,
- action des sulfates,
- attaque par alcalinité forte,
- corrosion bactérienne avec formation de H_2S.

	Portland CPA	**Cents fondus alumineux**	**Ciments sursulfatés CSS**	**Laitier de Clinker CLK**
SiO_2	20-25 %	5-16		
$A1_2O_3$	2- 8 %	30		
CaO	60-65 %	35110 %	50 %	40-45
SO_3	< 4 %	< 2,5 %	> 5 %	< 5 %

8.2.1. Agressivité carbonique

L'attaque des ouvrages par le dioxyde de carbone a lieu en présence d'eaux douces ou dès que la teneur du $C0_2$ en excès dépasse 15 $mg.l^{-1}$. Mais la réserve d'alcalinité en chaux du béton est élevée à l'intérieur des pores et permet la précipitation d'un dépôt de $CaCO_3$ et d'autres sels, qui ralentit temporairement la vitesse de destruction du béton par ces eaux. Cette destruction peut devenir tolérable quand l'alcalinité bicarbonatée calcique de l'eau est supérieure à 5 ou 6 ° TAC et le pH supérieur à 6,5, c'est-à-dire au voisinage de l'équilibre carbonique.

8.2.2. Attaque par acidité forte

Cette attaque est d'autant plus grave que les sels de calcium formés sont plus solubles. Une corrosivité croissante est rencontrée en présence des acides suivants: phosphorique, sulfurique, nitrique, chlorhydrique.

nocifs, particulièrement dans les effluents de laiterie ou de fabrication de jus de fruits.

Dans le cas d'acidité modérée, on améliore la résistance de la corrosion en abaissant le rapport eau/ciment et/ou en utilisant des ciments alumineux (de mise en couvre d'ailleurs très délicate). Ceci est valable pour des pH supérieurs à 2 et avec certaines précautions.

Mais d'une façon générale, il y a souvent risque de fissuration des ouvrages, dont la protection totale ne peut jamais être assurée que par un revêtement correct. Par ailleurs, plusieurs législations relatives au déversement des eaux résiduaires préconisent de maintenir le pH de l'eau qui circule au contact des parois entre 4,5 (ou 5,5) et 9,5.

8.2.3. Action de l'ammonium

La présence d'ammonium dans les eaux résiduaires peut intervenir dans les processus de destruction du béton de deux façons:

Les acides organiques sont également

- par développement de réactions nitri

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

fiantes, et donc acidifiantes, qui ne peuvent toutefois se développer qu'en milieu aérobie, comme par exemple dans les réfrigérants atmosphériques,

- par dégagement de l'ammoniac déplacé par la chaux qui accélère la solubilisation de celle-ci et provoque la dégradation du ciment

Les sels de magnésium peuvent donner lieu au même processus (formation de Brucite). Les concentrations trop élevées en NH_4 et en Mg sont donc à éviter, tout particulièrement lorsqu'il y a également présence de sulfates.

8.2.4. Action des sulfates

Cette action est complexe; elle repose sur la transformation du sulfate de calcium en sel de CANDLOT ou Ettringite: - sulfatation de la chaux libre du ciment par les sulfates dissous dans l'eau

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4\ 2H_2O + 2NaOH$$

- transformation des aluminates du ciment en Ettringite très expansive (facteur 2 à 2,5):

$3\ CaO,\ A1_2O_3,12\ H_2O + 3\ CaSO_4,2\ H_2O + 13\ H_2O \rightarrow 3\ CaO,\ A1_2O_3,\ 3\ CaSO_4,\ 31\ H_2O$

En présence de magnésie, la décomposition des silicates alcalins du ciment peut également s'ajouter aux deux mécanismes précédents.

La recommandation AFNOR P 18.011 définit des classes d'agressivité des eaux salines vis-à-vis des bétons classiques ainsi que le principe des mesures de protection (cf. tableau 54).

Dans le cas d'eaux très fortement agressives, le recours à un revêtement est conseillé, tandis que, dans le cas des eaux fortement agressives, l'emploi de ciment à base de laitier présentant un indice d'hydraulicité élevé peut être envisagé, si par ailleurs d'autres paramètres chimiques de l'eau ne sont pas à prendre en compte.

Exemples

- ciment de laitier au clinker (CLK) à base de 80 % de laitier granulé,
- ciment de haut fourneau (CHF) à 60-75 % de laitier.

En présence d'eau de mer on dispose aussi de différents ciments qui présentent des teneurs faibles en "C_3A".

8.2.5. Attaque par alcalinité forte

(NaOH, KOH, Na_2CO_3)

La présence de cette alcalinité forte est nocive vis-à-vis de tous les ciments, en raison du risque de solubilisation de certains constituants à base d'alumine, et l'on conseille, en l'absence de revêtement, de ne pas admettre d'eaux de pH supérieur à 12 au contact de ciments alumineux.

8.2.6. Corrosion bactérienne avec formation de H_2S

Cette corrosion se rencontre dans le transfert des eaux résiduaires urbaines. Le principe du mécanisme de la corrosion en milieu anaérobie a déjà été décrit, mais, alors que, dans les circuits de refroidissement, ce processus suit et amplifie une corrosion chimique préalable, dans le cas d'eaux vannes ou d'eaux très sales, il provient généralement de la fermentation anaérobie des matières déposées et comporte deux phases

- formation et libération de H_2S.
- oxydation de H_2S. en présence d'eau et formation de H_2SO_4.

Ces réactions sont accélérées dès que le pH descend au-dessous de 6 et le sont d'autant plus que les eaux sont plus chaudes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

En égout, l'attaque s'effectue au-dessus préalable des eaux ainsi que l'apport de l'eau en raison du dégazage et de la d'oxygène ou d'oxydant évitent plus ou condensation de l'eau. La décantation moins totalement cette formation de H_2S.

Tableau 54. Agressivité de solutions et de sols

(Extrait Recommandations AFNOR P. 18.011)

Degré d'agressivité	**A_1**	**A_2**	**A_3**	**A_4**
Environnement	**Faiblement agressif**	**Moyennement agressif**	**Fortement agressif**	**Très fortement agressif**
Agents agressifs	**Concentration en mg.l^{-1}**			
CO_2 agressif	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
SO_4^-	250 à 600	600 à 1500 (1)	1500 à 6 000	> 6 000
Mg^{2+}	100 à 300	300 à 1500	1500 à 3 000	> 3 000
NH_4^+	15 à 30	30 à 60	60 à 100	> 100
pH	6,5 à 5,5	5,5 à 4,5	4,5 à 4	< 4

(1) La limite est fixée à 3 000 mg.l^{-1} pour l'eau de mer.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

9. VIEILLISSEMENT DES MATIÈRES PLASTIQUES

Comme les aciers et les bétons, les matières plastiques subissent aussi une altération en fonction du temps. Ses causes sont multiples, on l'appelle vieillissement. La durée de vie utile dépend de la propriété considérée du matériau et de ses conditions d'utilisation.

L'appréciation de cette durée de vie est difficile car on demande souvent à ces matériaux une résistance mécanique et une résistance chimique qui peuvent être affectées par les nombreux adjuvants ou charges qui leur sont incorporés (plastifiants, pigments, anti-oxygène, voire impuretés).

Les altérations potentielles qui peuvent concerner le traiteur d'eau, en dehors des aspects mécaniques sont principalement

- la destruction chimique ou biologique du matériau en milieu réactif liquide,
- le relargage de substances organiques dans le réseau utilisateur: eaux potables et ultrapures en particulier,
- l'évolution sous le rayonnement solaire avant mise en eau: réalisations en zone tropicale, durées de stockage prolongées.

9.1. VIEILLISSEMENT PHYSIQUE

Par pénétration de solvants ou d'eau (gonflement), perte de plastifiant contrainte sous tensio-actif ou chocs thermiques.

9.2. VIEILLISSEMEN CHIMIQUE

Il se manifeste selon de nombreux modes impliquant des dépolymérisations ou des coupures de chaînes:

- thermo-oxydatif à l'air et à température modérée,
- chimique en milieu liquide (réactifs),
- biochimique (détérioration par micro-organismes ou champignons),
- hydrolytique, par réaction lente de certains polymères avec l'eau (esters acryliques).

9.3. VIEILLISSEMENT CLIMATIQUE

(Weathering)

A l'atmosphère, il est dû à l'exposition directe au rayonnement solaire et aux pluies et les causes en sont principalement photo-thermiques:

- les processus de photo-oxydation sont

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

induits par le rayonnement UV solaire et liés souvent à certains additifs (colorants, pigments, charges minérales). La photostabilisation des matériaux peut être assurée par plusieurs voies dont la création d'écrans internes opaques ($Ti0_2$, ZnO et surtout noir de carbone) ou par écrans externes supprimant le rayonnement,

- l'augmentation de température et la pluie (hydrolyse) sont des facteurs synergiques,
- l'ozone, coupant les doubles liaisons, a, aussi une action néfaste sur les caoutchoucs polydiéniques, les polystyrènes ou l'ABS.

9.4. UTILISATIONS GÉNÉRALES

Ces hypothèses diverses impliquent une longue méthodologie de connaissance des matériaux nouveaux. Des exemples d'utilisations de matériaux éprouvés peuvent être rappelés en ce qui concerne le traitement des eaux

- ABS et PVDF en réseaux d'eau ultrapure,
- PVC ou PVC "clean pipe" en réseaux d'eau potable et embouteillage,
- PEHD en réseaux d'eau potable,
- résines polyester pour revêtements anti-acides,
- revêtements PTFE ou résines furaniques en présence d'hydrocarbures aromatiques jusqu'à 120 °C,
- polypropylène en traitements à chaud jusqu'à 100 °C.

Pour véhiculer des eaux résiduaires concentrées ou des réactifs liquides, il faut consulter les tables d'utilisation des matériaux ou revêtements envisageables. La présence de polluants imprévus peut toutefois nuire à certaines utilisations.

Les fabricants peuvent proposer des canalisations enterrées avec des durées de vie atteignant 50 ans pour le PEHD, par exemple.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

8
FORMULAIRE

Le MÉMENTO TECHNIQUE DE L'EAU a eu pour but, à son origine, de mettre à disposition de l'ingénieur ainsi que du technicien de traitement d'eau, les données de base et les informations pratiques les plus usuelles.

Avec le temps les connaissances auxquelles fait appel l'ingénierie du traitement d'eau se sont considérablement approfondies et diversifiées, mais la nécessité demeure de réunir les informations et les données numériques ou graphiques simples le plus souvent nécessaires au technicien, en particulier lors de l'établissement d'un projet rapide ou lors d'une mise en route. Le formulaire a pour but de répondre à cette attente, mais il est toujours difficile d'en circonscrire le contenu dont le volume doit demeurer limité: par exemple, la définition de volumes géométriques élémentaires peut être utile pour connaître la capacité d'un stockage de réactifs; le rappel de certaines dispositions réglementaires essentielles, en matière de rejet d'eaux usées, rend service au responsable de chantier peu familier de ces problèmes de réglementation, etc.

Certains trouveront évidemment ce formulaire incomplet, d'autres estimeront qu'il contient trop de données élémentaires connues de tous. Son ambition est de rendre service au plus grand nombre des usagers du MÉMENTO. Ce n'est qu'une caisse à outils. Chacun y prend ce qui lui est utile.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. UNITÉS DE MESURE

1.1. SYSTÈMES D'UNITÉS

Les systèmes d'unités dérivés du système métrique ont progressivement fait place à un système unique, appelé Système International d'Unités (S.I.) auquel est consacré la première partie de ce sous-chapitre. Le système C.G.S. (centimètre, gramme-masse, seconde) dont la plupart des unités correspondent à des multiples ou sous-multiples décimaux du Système International conserve encore de l'intérêt dans certains domaines.

Du fait de la persistance de l'emploi dans de nombreux pays du système anglo-saxon, avec ses variantes britannique et américaine, la seconde partie donne les correspondances entre les unités de ces systèmes et celles du S.I.

1.1.1. Système International d'Unités (SI)

Ce système, établi et amélioré progressivement par les travaux des Conférences Générales des Poids et Mesures (CGPM) et du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), comporte des unités de base, des unités dérivées, des unités supplémentaires. Son application fait appel à des multiples et sous-multiples décimaux, avec les préfixes correspondants. Il admet, outre les unités énumérées plus bas, des unités dites "en usage avec le Système International" et des unités "admises temporairement". Il déconseille en principe l'emploi des unités CGS et d'autres unités.

Les tableaux ci-après constituent des extraits du Système International relatifs aux unités qui, à des titres divers, intéressent le traitement d'eau. Les premiers d'entre eux sont empruntés à des documents édités par l'AFNOR et en particulier au tableau synoptique: "Le Système International d'Unités (S.I.)" conforme au fascicule de documentation NF X 02-004.

Nota :

Les extraits des normes AFNOR reproduits dans cet ouvrage le sont avec l'autorisation de l'Association Française de Normalisation (Tour Europe, Cedex 7, 92080 PARIS La Défense) à qui il y a lieu de s'adresser pour toute commande de document complet: seules font foi les normes originales dans leur édition la plus récente.

1.1.2. Principes généraux

- **Règles d'écriture des symboles d'unités**

Les symboles d'unités ne s'emploient qu'après un nombre exprimé en chiffres. Ils sont imprimés en caractères droits, sont invariables au pluriel, s'écrivent sans point final et sont placés après les valeurs numériques complètes, en laissant un espace entre la valeur numérique et le symbole.

Ils s'écrivent en lettres minuscules; toutefois, la première lettre est une majuscule lorsque le nom de l'unité dérive d'un nom propre.

On ne doit pas faire figurer plus d'une barre de fraction sur la même ligne pour représenter une unité composée qui est le quotient de deux unités, à moins d'utiliser des parenthèses pour éviter toute ambiguïté.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Unités de base**

Grandeur	Unité	Symbole
• longueur	mètre	m
• masse	kilogramme	kg
• temps	seconde	s
• intensité de courant électrique	Ampère	A
• température thermodynamique	Kelvin	K
• quantité de matières	mole	mol
• intensité lumineuse	candela	cd

NOTE: La température Celsius t est liée à la température thermodynamique T par la relation t=T-273,15.

Un intervalle de température peut être exprimé soit en Kelvins, soit en degrés Celsius. Dans ce cas, 1°C=1K.

- **Unités supplémentaires**

(Ces unités peuvent être utilisées comme unités de base.)

Grandeur	Unité	Symbole
angle plan	radian	rad
angle solide	stéradian	sr

- **Multiples et sous-multiples**

Facteur	Préfixe	Symbole
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	téra	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	méga	M
10^{3}	kilo	k
10^{2}	hecto	h
10	déca	da
10^{-1}	déci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	µ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	alto	a

1.1.3. .des *unités de base*

- **Unités de base**

mètre: le mètre est la longueur égale à 1650763,73 longueurs d'ondes, dans le vide, de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux 2 p_{10} et 5 d_5 de l'atome de krypton 86.

kilogramme: le kilogramme est l'unité de masse; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

seconde: la seconde est la durée de 9192 631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

Ampère: l'ampère est l'intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2 x 10^{-7} Newton par mètre de longueur.

Kelvin: le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,15 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

mole: la mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.

candela: la candela est l'intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de 1/600 000 mètre carré d'un corps noir, à la température de congélation du platine, sous la pression de 101325 Newtons par mètre carré

- **Unités supplémentaires**

radian: le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui interceptent, sur la circonférence d'un cercle, un arc de longueur égale à celle du rayon

stéradian: le stéradian est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe, sur la surface de cette sphère, une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté le rayon de la sphère.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.1.4. Unités de base. Unités dérivées pour des grandeurs usuelles.

Grandeur	Unité		Expression en autres Unités S.I.	Expression en Unités de base (U.B). ou en unités supplémentaires (U.S).	Unités en usage avec le S.I. ou admises temporairement (T)		
	Nom	Symbole			Nom	Symbole	Valeur en unité
Espace et temps							
longueur	mètre	m		(U.B.)	Angstrom (T)	Å	1Å = 10^{-10} m
					mille marin (T)		1 mille = 1 852 m
Aire	mètre carré	m^2		m^2	are (T)	a	1 are = 100m^2
superficiie					hectare (T)	ha	1 ha = 10^4 m^2
Volume	mètre cube	m^3		m^3	litre	l	1 l = 1 dm^3
Angle plan	radian	rad.		(U.S.)	degré	°	1° = (π / 180 rad)
					minute		1 = (1 / 60)°
					seconde		1 = (1 /60)
Angle solide	stéradian	sr		(U.S.)			
Temps	seconde	s		(U.B.)	minute	min	1 min = 60 s
					heure	h	1 h = 60 min
			jour	d	1d = 24 h		
Vitesse angulaire	radian par seconde	rad. s^{-1}		s^{-1} rad			
Vitesses	mètre par seconde	m. s^{-1}		m. s^{-1}	nœud (T)	kn	kn = 1 852 m / h
Accélération	mètre par seconde carrée	m. s^{-2}		m. s^{-2}			
Fréquence	Hertz	Hz		s^{-1}			
Mécanique							
Masse	kilogramme	kg		(U.B.)	tonne	t	1 t = 10^3 kg
Masse Volumique	kilogramme par mètre cube	kg. m. $^{-3}$		m. $^{-3}$kg			
Débit-masse	kilogramme par seconde	kg. s. $^{-1}$		kg. s. $^{-1}$			
Débit-volume	mètre cube par seconde	m^3. s - 1		m^3. s^{-1}			
Quantité de mouvement	kilogramme mètre par seconde	kg. m. s^{-1}		m. kg. s^{-1}			
Moment cinétique	kilogramme mètre carré par seconde	kg .m^2. s^{-1}		m^2. kg. s^{-1}			
Moment d'inertie	kilogramme mètre carré	kg. m^2		m^2. kg			
force	newton	N	kg.m. s^{-2}	m.kg.s^{-2}			
Moment d'une force	newton mètre	N.m		m^2. kg. s^{-2}	bar (T)	bar	1 bar = 10^5 Pa
Pression contrainte	pascal	Pa	N.m^{-2}	m -^{1}. kg. s^{-2}	atmos-phère normale (T)	atm	1atm= 101 325 Pa
Viscosité dynamique	pascal seconde	Pa . s	m -^{1} kg. s^{-1}				
Viscosité cinématique	mètre carré par seconde	m^2. s^{-1}	m^2. s^{-1}				
Tension superficielle	newton par mètre	N.m^{-1}					
Énergie, travail, quantité de chaleur	joule	j	N.m	m^2. kg. s^{-2}			
Puissance	watt	W	J.s^{-1}	m^2. kg. s^{-3}			

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Grandeur	Unité		Expression en autres Unités S.I.	Expression en Unités de base (U.B.). ou en unités supplémentaires (U.S).
	Nom	Symbole		
Thermodynamique				
Température thermodynamique	Kelvin	K	(U.B).	
Coefficient de dilatation linéique	kelvin à la puissance moins un	K^{-1}		
Conductivité thermique	watt par mètre-kelvin	W/(m-k)		$m.\ kg.s^{-3}.\ K^{-1}$
Chaleur massique	joule par kilogramme. kelvin	J/(kg-k)		$m^{2}.\ s^{-2}.\ K^{-1}$
Entropie	joule par kelvin	$J.\ K^{-1}$		$m^{2}.\ kg.\ s^{-2}.\ K^{-1}$
Énergie interne enthalpie	joule	J		$m^{2}.\ kg.\ s^{-2}.$
Optique				
intensité lumineuse	Candela	cd		(U.B.)
Flux lumineux	lumen	lm		cd.sr
Éclairement	lux	lx	$lm..m^{-2}.$	$m^{-2}.\ cd.\ sr$
Électricité magnétisme				
Intensité de courant électrique	ampère	A		(U.B.)
Charge électrique	coulomb	C	A.s	s.A
Potentiel. différence de potenteil. tension	volt	V	$W.A^{-1}$	$m^{2}.\ kg.\ S^{-3}.\ A^{-1}$
Champ électrique	volt par mètre	$V.m^{-1}$		$mk;\ g.\ S^{-3}.\ A^{-1}$
Capacité	farad	F	$C.V^{-1}$	$m^{-2}.\ kg^{-1}.\ s^{4}.\ A^{2}$
champ magnétique	ampère par mètre	$A.m.^{-1}$		$m^{-1}.\ A$
Flux d'induction magnétique	weber	Wb	V.s	$m^{2}.\ kg.\ S^{-2}.\ A^{-1}$
Induction magnétique	tesla	T	$Wb.m^{-2}.$	$kg.\ s^{-2}.\ A^{-1}$
Inductance perméance	henry	H	Wb/A	$m^{2}.\ kg.\ s^{-2}.\ A^{-2}.$
Résistance impédance réactance	ohm	Ω	V/A	$m^{2}.\ kg^{-1};\ s^{3}.\ A^{-2}.$
Conductance	Siemens	S	A/V	$m^{2}.\ kg^{-1};\ s^{3}.\ A^{-2}.$
Résistivité	ohm - mètre	Ω.m		$m^{3}.\ kg.\ s^{-3}.\ A^{-2}.$
Conductivité	siemens par mètre	S/m		$m^{-3}.\ kg^{-1}.\ A^{-2}.$
Chimie physique, physique moléculaire				
Quantité de matière	mole	mol		(U.B.)
Masse molaire	kilogramme par mole	$kg.mol^{-1}$		$kg.mol^{-1}$
Volume molaire	mètre cube par mole	$m^{3}.mol^{-1}$		$m^{3}.mol^{-1}$
Concentration	kilogramme par mètre cube	$kg.\ m^{-3}$		$m^{3}.\ kg$
Concentration molaire	mole par mètre cube	$mol.m^{-3}$		$m^{-3}\ mol$
Molalité	mole par			

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.1.5. Unités déconseillées ou à éviter

Grandeur	Symbole de l'unité S.I.	Unités C.G.S	Autres unités (à éviter)
Volume	m^3		stère (st) ; 1 st = 1 m^3
Masse	kg		carat ; 1 carat = 200 mg
Force	N	dyne 1 dyn = 10^{-5} N	kg (f); 1 kg (f) = 9,81 N
Moment d'une force	N.m		m.kg (f) ; 1 m.kg (f) = 9,81 N.m
Pression	Pa	barye ; 1 barye= 10^{-1} Pa	kg (f) / cm, mètre de colonne d'eau mm de Hg ;
Viscosité dynamique	Pa.s	poise (P); 1 P = 10^{-1} Pa.s	poiseuille (Pl): 1 Pl = 1 Pa.s
Viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$	stokes (St) : 1St=10^{-4} m^2. s^{-1}	
Énergie, travail, quantité de chaleur	J	1 erg = 10^{-7} J	kg (f). m ; 1kg (f). m = 9,81 J calorie (cal) : 1 cal = 4,187 J kilocalorie (kcal) = millithermie (mth) ; 1 kcal = 4187 J
Puissance	W	erg. s^{-1} erg. s^{-1} = 10^{-7}	kg (f) m. s^{-1} 1 kg (f) m. s^{-1} = 9,81 W
Flux d'induction magnétique	Wb	maxwell ; 1 Mx = 10^{-5} Wb	
Induction magnétique	T	gauss : 1 Gs = 10^{-4} T	
Conductance	S		mho : 1 mho = 1 S

1.2 . UNITES S.I. ET ANCIENNES UNITES ANGLO-SAXONNES CODIONS

1.2.1. Longueur

Symbole		
.in ou ''	.inch (pouce)……	= 0,0254 m
.ft ou'	.foot (pied) = 12 in……..	= 0,3048 m
.yd	.yard = 3 ft……...	= 0,9144 m
.mi	.statute mile = 1760 yd……	= 1,609 km
.m	.mètre……..	˜ 1,0936 yd ˜ 39,37 in ˜ 3,281 ft ≈ $3'3\frac{3''}{8}$
.km	.kimomètre……..	˜ 0,6215 mi

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.2. Surface

Symbole		
.in^2	Square inch……	= 6,4516 cm^2
.ft^2	Square foot (144 in^2)……..	˜ 9,2903 dm^2
.yd^2	Square yard (9 ft^2)……..	˜ 0,83613 m^2
.$mile^2$	Square mile (640 acres)……..	˜ 2,5900 km^2
	Acre (4 roods) (4 840 yd^2)……	˜ 0,40469 ha
.cm^2	Centimètre carré……	˜ 0,1550 in^2
.m^2	Mètre carré……	˜ 10,764 ft^2
.dam^2, a	Décamètre carré ou are……..	˜ 119,6 yd^2
.hm^2, ha	Hectomètre carré ou hectare……..	˜ 2,471 acres
.km^2	Kilomètre carré……..	˜ 0,3861 $mile^2$

1.2.3. Volume et capacité

Symbole		
.in^2	Cubic inch……..	˜ 16,3871 cm^3
.ft^3	Cubic foot……..	˜ 28,317 dm^3
.yd^3	Cubic yard……..	˜ 0,7646 m^3
.U.K.Pt	British pint (4 gills)……..	˜ 0,5683 1
.U.K. qt	British quart (2 U.K. pt)..……..	˜ 1,1365 1
.U.K. gal	Imperial gallon (8 U.K. Pt)…….....	˜ 4,5461 1
.U.S. Pt	U.S. liquid pint (4 gins)……..	˜ 0,4732 1
.U.S. qt	U.S. liquid quart (2 U.S. liq Pt)……..	˜ 0,94641
.U.S. gal	U.S. gallon (4 USA liq Pt)……	˜ 3,78541
.Bbl	U.S. barrel (petroleum) = 42 U.S. gal……...	˜ 158,987 1
.Bu	U.S. bushel (4 pecks)……	˜ 35,2391 1
	U.S. shipping ton = 40 ft^3……..	˜ 1,13267 m^3
	Registered ton = 100 ft^3……	˜ 2,83168 m^3
	Acre foot……...	˜ 1233,5 m^3
.cm^3, ml	Centimètre cube ou millilitre……	˜ 0,0611 in^3
.dm^3,1	Décimètre cube ou Litre……	˜ 0,0353 ft^3
	* 1 litre =1 dm^3 exactement, et non plus, suivant l'ancienne définition le volume de 1 kg d'eau à 4 °C qui devient égal à 1,000 028 dm^3.	˜ 1,760 U.K. Pt
		˜ 0,220U.K. gal
		˜ 2,113U.S. Pt
.m^3,st	Mètre cube ou stère……...	˜ 0,264U.S. gal
		˜ 35,30ft^3
		˜ 1,3079yd^3
		˜ 2 2 0U.K. gal
		˜ 264U.S. gal
		˜ 6,293U.S. bbl
		˜ 28,37U.S. bu

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.4. Vitesse linéaire

Symbole		
.in.s^{-1}	Inch per second……..	= 91,44 m.h^{-1}
.ft.s^{-1}	Foot per second……..	= 1,09728 km.h^{-1}
.yd.s^{-1}	Yard per second……..	= 0,9144 ms^{-1}
.mile.h^{-1}	Mile per hour (statute)……	˜ 1,609 km.h^{-1}
.m.s^{-1}	Mètre par seconde……..	˜ 3,280 ft.s^{-1}
.m.h^{-1}	Mètre par heure……..……..……...	˜ 3,280 ft.h^{-1}
.km.h^{-1}	Kilomètre par heure……	˜ 0,622 mile.h^{-1}

1.2.5. Vitesse de filtration

Symbole		
U.S. gal/ft^2.min	U.S. gal/min. sq. ft. (U.S. gpm/sq ft)	˜ 2,445 m.h^{-1}
U.K. gal/ft^2.min	U.K. gal/min. sq. ft. (U.K. gpm/sq ft)	˜ 2,936 m.h^{-1}
ft.min^{-1}	cu.ft/min. sq. ft. (ft^3/ft^2 min)	˜ 18,29 m.h^{-1}
m.h^{-1}	Vitesse linéaire de 1 m par heure	˜ 0,0547 ft.min
	Mètre cube par heure et par mètre carré	˜ 0,409 U.S. gpm/sq ft
		˜ 0,341 U.K. gpm/sq ft

1.2.6. Masse

Symbole			
.gr	Grain……	64.799 mg	
.oz	Ounce……..	28.350 g	
.lb	Pound (livre) = 16 oz = 7000gr……..	453.592 g	
.st	British stone (14 lb)…….	6.350 kg	
.qr	Quarter (British) (28 lb)……...	12.701 kg	
.cwt	Hundred-weight (British) (112 lb)……...	50.802 kg	
U.K. ton	Long ton (British) (2240 lb)…….	1.016 t	
.sh. cwt	Hundred-weight (U.S.A) (2000 lb)……..	45.359 kg	
.sh. ton	Short ton (U.S.A. (2000 lb)……..	0.907 t	
.kg	Kilogramme……..	35.274 oz	
		2.205 lb	
			19.684 cwt
.t	Tonne……...		22.046 sh. cwt
			1.1205 sh. ton
			0.9842 U.K. ton

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.7.Force

Symbole		
pdl	Poundal (pied-livre/s')	0,0138 daN
lbf	Pound-force (livre-force)	0,448 daN
tonf	Ton-force (British) (2 240 lbf).	996,402 daN
	Ton-force (U.S.A.) (2 000 lbf)	889,644 daN

1,2,8, Pression - Contrainte

Symbole		
$lbf.in^{-2}$	Pound-force per square inch……	6 894,76 Pa
ou psi		0,0689476 bar
		ou hpz ou $daN.cm^{-2}$
$lbf.ft^{-2}$	Pound-force per square foot……	47,87 Pa
$tonf.in^{-2}$	Ton-force per square inch (British)…….	154,44 bar
	Ton-force per square inch (U.S.A.)…….	137,90 bar
in H_2O	Inch of water……..	2,49 mbar
in Hg	Inch of mercury……..…	33,86 mbar
Pa	Pascal (=1 $N.m^{-2}$)…….……	0,0209 $lbf.ft^{-2}$
bar	Bar (=1 hpz)……..	14,504 $lbf.in^{-2}$
	Atmosphère……..	14,696 $lbf.in^{-2}$

1,2,9, Viscosité

Symbole		
pdl $s.ft^{-2}$	Viscosité dynamique	
	Poundal second per square foot	
	(Pound per foot second)……...	˜ 1,4882 Pa.s
$In^2.s^{-1}$	Viscosité cinématique	
	Inch squared per second……...	˜ 6,45 2.10^{-4} $m^2.s^{-1}$

1,2,10. Masse volumique et concentration

Symbole		
$lb.in^{-3}$	Pound per cubic inch……..	27,6799 $g.cm^{-3}$
$lb.ft^{-3}$	Pound per cubic foot……..	16,0185 $kg.m^{-3}$
gr.U.K. gal^{-1}	Grain per imp. Gallon……..	14,25 Mg. 1^{-1}
gr.U.S. gal^{-1}	Grain par U.S. gallon……..	17,12 $mg.l^{-1}$
lb.U.K. gal^{-1}	Pound per Imp. Gallon……	99,77 $g.l^{-1}$
lb.U.S. gal^{-1}	Pound per U.S. gallon……..	119,3 $g.l^{-1}$
$gr.in^{-3}$	Grain per cubic inch ……...	10,076 $g.l^{-1}$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Symbole		
gr.ft^{-3}	Grain per cubic foot……..	2,296 mg.l^{-1}
g.cm^{-3}	Gramme par cm^3 =1 kg.dm^{-3}……	0,036127 lb.in^{-3}
kg.dm^{-3}	Kilogramme par dm^3 = 1 g.cm^{-3}……	62,427 lb.ft^{-3}
mg.l^{-1}	Milligramme par litre……	0,0703 gr.U.K. gal^{-1}
g.m^{-3}	Gramme par m^3……..	0,0584 gr.U.S. gal^{-1}
		0,4356 gr.ft^{-3}

1.2.11 Énergie – Travail – Chaleur

Symbole.		
ft pdl	Foot poundal…….	0.04214 J
ft lbf	Foot pound-force……..	1.356 J
hp h	Horse-power-hour……..	2.685.10^6 J
		0.746 kWh
		0.641 th
B.T.U	British thermal unit……	1055.06 J
		0.293 Wh
		0.252 mth
	Therm (=10^5 B.T.U.)……	105500 kJ
		25200 kcal
J	Joule (= 10^7 erg = 0.239 cal)……	23.72 ft pdl
		0.737 ft lbf
Kj	Kilojoule (= 1/3.6 Wh)……..	0.3725.10^{-3} hp h
		0.948 B.T.U.
Wh	Wattheure (= 3600 J = 0.860 mth)……..	3.41 B.T.U.
.kWh	Kilowattheure (= 3600kJ)……	1.34 hp h
.cal	Calorie (= 4.187 J)……	
.kcal	Kilocalorie (= 1.163 Wh)……..	3.97 B.T.U.
.mth	.ou Millithermie……..	1.56.10^{-3} hp h
.th	Thermie (=10^3 kcal)……..	

1.2.12. Pouvoir calorifique

Symbole		
B.T.U. lb^{-1}	British thermal unit per pound……	2.326 J.g^{-1}
		0.556 mth.kg^{-1}
B.T.U. ft^{-3}	British thermal unit per cubic foot…….	37.259 kJ.m^{-3}
		8.901 mth.m^{-3}
kcal.m^{-3}	Kilocalorie par mètre cube	
ou	Ou……..	0.1124 B.T.U.ft^{-3}
mth.m^{-3}	Millithermie par mètre cube	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.13. Puissance

Symbole		
ft pdl.s^{-1}	Foot poundal per second…….	0.04214 W
ft lbf.s^{-1}	Foot pound-force per second……..	1.35582 W
hp ou HP	Horsepower (= 550 ft lbf/s)……..…..…..	0.74570 kW
B.T.U. h^{-1}	British thermal unit per hour……	0.2931 W
		0.252 mth.h^{-1}
B.T.U. s^{-1}	British thermal unit per second……	1.055 kW
		0.252 mth.s^{-1}
kW	Kilowatt.……	1.341 hp
		0.948 B.T.U.s^{-1}
mth.h^{-1}	Millithermie par heure.……..	3.968 B.T.U.h^{-1}
mth.s^{-1}	Millithermie par seconde……..	2.968 B.T.U.s^{-1}

1.2.14. Correspondance de diverses unités

Pression

Les chiffres donnent la valeur d'une unité ci-dessous indiquée	Bar	Atmosphère	mm de mercure	Mètre d'eau	Pascal (SI)
Pascal (SI)	10^{-5}	$9{,}87.10^{-6}$	0,0075	$1{,}020.10^{-4}$	1
Bar	1	0,98692	749,75	10,1972	10^{5}
Atmosphère normale	1,01325	1	760	10,3323	101325
Kgf.cm^{-2}	0,98066	0,96784	735,514	10	$9{,}81.10^{4}$
Mètre de mercure	1,33377	1,316	1000	13,596	$1{,}33.10^{5}$
Mètre d'eau (à 4 °C)	0,09807	0,09678	73,551	1	$9{,}81.10^{3}$

Énergie

Les chiffres donnent la valeur d'une unité ci-dessous indiquée	joule	kWh	kcal ou mth	hp h	B.T.U.
joule	1	$27{,}78.^{10\text{-}8}$	238.10^{-6}	$37{,}25.^{10\text{-}4}$	$948.^{10\text{-}6}$
Kilowattheure	$3{,}6.10^{6}$	1	860	1,341	3 413
Kilocalorie	4186	116.10^{-5}	1	156.10^{-5}	3,968
Horsepowerhour	$2{,}68.10^{6}$	0,746	641	1	2 545
British thermal unit	1055	293.10^{-6}	0,252	393.10^{-6}	1

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Débit

Valeur d'une unité indiquée ci-dessous	$m^3.h^{-1}$	$m^3.s^{-1}$	$l.s^{-1}$	1000 $m^3\ d^{-1}$	$ft^3.s^{-1}$	ft^3,mn^{-1}	U.S. gpm	U.S. mgd	U.K. gpm	U.K. mgd
$m^3.h^{-1}$	1	278.10^{-6}	0,2778	0,024	$9,81.10^{-3}$	0,588	4,403	$6,34.10^{-3}$	3,667	$5,28.10^{-3}$
$m^3.s^{-1}$	3 600	1	1000	86,4	35,30	2118	15 852	22,82	13198	19,00
$l.s^{-1}$	3,6	0,001	1	0,0864	$35,3.10^{-3}$	2,118	15,85	$22,8.10^{-3}$	13,198	19.10^{-3}
1000 $m^3.d^{-1}$	41,67	$11,6.10^{-3}$	11,575	1	0,4085	24,5	183,47	0,264	152,85	0,220
$ft^3.s^{-1}$	102	$28,3.10^{-3}$	28,317	2,448	1	60	449	0,647	374	0,538
$ft^3.min^{-1}$	1,70	472.10^{-6}	0,472	0,0408	0,0167	1	7,48	0,0108	6,235	$8,98.10^{-3}$
U.S. gpm	0,2271	$6,3.10^{-5}$	0,0631	$5,45.10^{-3}$	$2,223.10^{-3}$	0,1336	1	$1,44.10^{-3}$	0,833	1,20.10
11.S. mgd	157,7	$43,8.10^{-3}$	43,80	3,785	1,546	92,80	694	1	578	0,832
U.K. gpm	0,2728	$7,58.10^{-5}$	0,0758	$6,54.10^{-3}$	$2,764.10^{-3}$	0,1605	1,201	$1,73.10^{-3}$	1	$1,44.10^{-3}$
U.K mgd	! 189,42	$52,6.10^{-3}$	52,61	4,545	1,857	111,4	834	1,20	694	1

Température

$F =$ Température Fahrenheit

$$F = 32 + \frac{9}{5} C$$

$C =$ Température Celsius

$$C = \frac{5}{9} (F - 32)$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.3. UNITÉS DIVERSES

1.3.1. Unités radioactives

- **Becquerel (Bq)**

C'est l'unité de mesure de la radioactivité. Il correspond à une désintégration (ou transformation d'un atome) par seconde.
On utilise aussi le Curie

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 37\ 10^9 \text{ Bq}$$

- **Gray (Gy)**

La mesure de la quantité de radiation reçue ou dose absorbée par une personne ou une masse de matière s'exprime en Gray.

1 Gy =1 joule par kilogramme

On utilise aussi le rad: 1 Gy =100 rad.

- **Sievert (Sv)**

A dose égale, l'effet produit par les divers rayonnements sur une personne varie selon leur nature et les organes exposés. Il se mesure en Sievert.

Le Sievert est **l'équivalent de dose efficace**.

Si EBR est **le coefficient d'efficacité biologique relative** du rayonnement :

1Sv = 1Gy X EBR

On utilise aussi le Rem

1 Sv = 100 Rem.

1.3.2, Unités sucrières

- **Densité**

Brix-poids C'est le nombre de grammes de saccharose pour 100 g de solution. Brix-volume C'est le nombre de grammes de saccharose pour 100 ml de solution.

Note : l'étalonnage étant fait à 15 °C, si d est la densité du liquide à 15 °C exprimée par rapport à la densité de l'eau à 4 °C prise comme unité, on a:

Brix-Volume = Brix-Poids X d

1,3,3. Unité laitière

- **Degré Dornic**

1 degré Dornic est égal à un décigramme d'acide lactique par litre de liquide.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. MATHÉMATIQUES

2.1. ALGÈBRE - ARITHMÉTIQUE

- **Progressions**

La **progression arithmétique** est de la forme

a; a + r ; a + 2 r ; ... a + (n - 1)r

Premier terme a ; raison r.

Valeur du terme p de rang n

A + (n - 1)r = p

Somme des n premiers termes

$$S = \frac{(a + 1)n}{2}$$

La **progression géométrique** est de la forme :

a ; aq ; aq^2 ; ... aq^{n-1}

Premier terme a ; raison q

Valeur du terme de rang n : p = aq^{n-1}.

Somme des n premiers termes

$$S = \frac{a(q^n - 1)}{q - 1}$$

Somme des termes en nombre infini

Quand :

$$q < 1 : \left(S = \frac{a}{1 - q}\right)$$

- **Arrangements**

Nombre total des arrangements possibles de m objets n à n

A_m^n = m(m - 1) (m - 2) (m - 3)...(m - n+1)

- **Permutations**

Nombre des permutations possibles avec m objets

Pm = 1 X 2 X 3 X 4 X 5... X m = m !

- **Combinaisons**

Nombre total des combinaisons possibles avec m objets pris n à n

$$C\frac{n}{m} = \frac{m(m-1)\,(m-2)\,\ldots\,(m-n+1)}{1.2.3.4.5.\,\ldots\,(n-1)n} = \frac{A_m^n}{n!}$$

- **Intérêts composés**

C : capital primitif, r : intérêt annuel de 1 franc.

A: capital obtenu après n années (intérêts composés).

$$A = C\,(1 + r)^n$$

- **Annuités**

A : valeur définitive d'une suite de n annuités égale à a

$$A = a\,\frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

- **Amortissements**

V = somme à amortir.

a = annuité pour amortissement et intérêt.

n = nombre d'annuités.

T = taux de l'amortissement.

$$T = \frac{r}{(1 + r)^n - 1}$$

$$a = \frac{Vr(1 + r)^n}{(1 + r)^n - 1} = V\,(T + r)$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2. FORMULES TRIGONOMÉTRIQUES

(Angle en radian)

• Relations de base

$$\sin^2 a + \cos^2 a = 1 \qquad \text{tg}\, a = \frac{\sin a}{\cos a} \qquad \cot a = \frac{1}{\text{tg}\, a}$$

$$\sin a = \cos\left(\frac{\pi}{2} - a\right) \qquad \cos a = \sin\left(\frac{\pi}{2} - a\right)$$

$$\text{tg}\, a = \text{cotg}\left(\frac{\pi}{2} - a\right)$$

$$\sin a = \sin(\pi - a) \qquad \cos a = -\cos(\pi - a)$$

$$\text{tg}\, a = -\text{tg}(\pi - a)$$

$$\cos a = \frac{1}{\pm\sqrt{1 + \text{tg}^2 a}} \qquad \sin a = \frac{\text{tga}}{\pm\sqrt{1 + \text{tg}^2 a}}$$

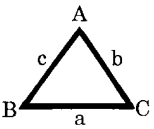
• Résolution des triangles

Triangles quelconques

$$A + B + C = \pi$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2\, b\, c \cos A$$

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}$$



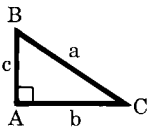
Triangles rectangles

$$A = \frac{\pi}{2} \qquad B + C = \frac{\pi}{2}$$

$$a^2 = b^2 + c^2$$

$$b = a \sin B = a \cos C = c\, \text{tg}\, B = c\, \text{cotg}\, C$$

$$c = a \cos B = a \sin C = b\, \text{tg}\, C = b\, \text{cotg}\, B$$



2.3. FORMULES DE GÉOMÉTRIE

2.3.1. Surfaces planes

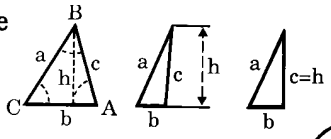
• Polygones réguliers

c = côté; R = rayon du cercle circonscrit.
n = nombre de côtés.
r = rayon du cercle inscrit.
S = surface du polygone.
Somme des angles d'un polygone : $(n - 2)\,\pi$

	R	*r*	*c*	S
Triangle	0,577 *c*	0,289 *c*	1,732 R ou 3,463 *r*	0,433 c^2 ou 1,299 R^2
Carré	0,707 *c*	0,500 *c*	1,414 R ou 2,000 *r*	1,000 c^2 ou 2,000 R^2
Pentagone	0,851 *c*	0,688 *c*	1,176 R ou 1,453 *r*	1,721 c^2 ou 2,378 R^2
Hexagone	1,000 *c*	0,866 *c*	1,000 R ou 1,155 *r*	2,598 c^2 ou 2,598 R^2
Heptagone	1,152 *c*	1,038 *c*	0,868 R ou 0,963 *r*	3,634 c^2 ou 2,736 R^2
Octogone	1,307 *c*	1,208 *c*	0,765 R ou 0,828 *r*	4,828 c^2 ou 2,828 R^2
Ennéagone	1,462 *c*	1,374 *c*	0,684 R ou 0,728 *r*	6,182 c^2 ou 2,892 R^2
Décagone	1,618 *c*	1,540 *c*	0,618 R ou 0,649 *r*	7,694 c^2 ou 2,939 R^2
Endécagone	1,775 *c*	1,703 *c*	0,563 R ou 0,587 *r*	9,366 c^2 ou 2,974 R^2
Dodécagone	1,932 *c*	1,866 *c*	0,518 R ou 0,536 *r*	11,19 c^2 ou 3,000 R^2

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

• **Triangle**



$$S = \frac{b.h}{2}$$

$$= \sqrt{p\,(p-a)\,(p-b)\,(p-c)}$$

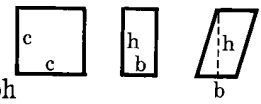
avec $p = \frac{a+b+c}{2}$

$$= \frac{a.b.c}{4\,R} \quad (R = \text{rayon du cercle circonscrit})$$

$$= pr \quad (r = \text{rayon du cercle inscrit})$$

$$= \frac{ab}{2}\sin C = \frac{ac}{2}\sin B = \frac{bc}{2}\sin A$$

• **Carré, rectangle, parallélogramme, trapèze, losange**

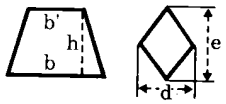


Carré : $S = c^2$

Rectangle : $S = bh$

Parallélogramme : $S = bh$

Trapèze : $S = \frac{b+b'}{2}h$

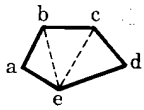


Losange : $S = \frac{d.e}{2}$

• **Polygones irréguliers**

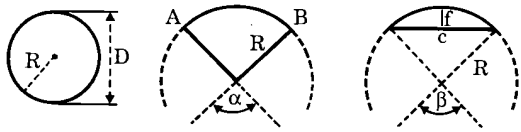
On décompose le polygone en triangles.

S = surface abe + surface bce + surface cde.



• **Cercle, secteur, segment, couronne, ellipse**

α, β en degrés



cercle *secteur* *segment*

Cercle : $S = \pi R^2 = \frac{\pi D^2}{4}$

Longueur de la circonférence $= 2\pi R$.

Secteur : $S = \frac{\text{arc AB} \times R}{2} = \frac{\pi R^2}{360}\cdot\alpha$

Segment : $S = \frac{\pi R^2 \beta}{360} - \frac{c}{2}(R\text{-}f)$

$$= \frac{R^2}{2}\left(\frac{\pi\beta}{180} - \sin\beta\right)$$

Corde $c = 2\sqrt{f(2R\text{-}f)} = 2R\sin\frac{\beta}{2}$

Arc (AB) $= \frac{R\pi}{180}\alpha$

Flèche $f = R\left(1\text{-}\cos\frac{\beta}{2}\right)$

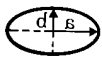
$$= R \pm \sqrt{R^2 - \frac{c^2}{4}}$$

α et β exprimés en degrés

$S = \pi(R^2\text{-}r^2)$
$= \pi(R\text{-}r)\,(R + r).$

couronne

ellipse



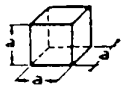
$S = \pi.a.b.$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.3.2. Surfaces et volumes des solides

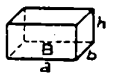
• **Cube**

S = surface totale
V = volume
$S = 6\,a^2$
$V = a^3$



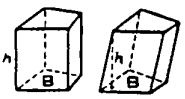
• **Parallélépipède rectangle**

$S = 2\,(ab + bh + ah)$
$V = B \times h = abh$



• **Prisme droit ou oblique**

$V = B \times h$
B = surface de base
h = distance perpendiculaire aux deux bases

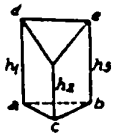


• **Tronc de prisme**

base triangulaire

$V = abc \times \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}$

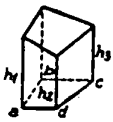
abc = surface de la base



base quadrilatère

$V = abcd \times \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4}$

abcd = surface de la base



• **Volume à bases parallèles rectangulaires** (obélisque)

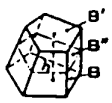
$V = \frac{h}{2}[(2\,a + a')b + (2\,a' + a)b']$

h = distance perpendiculaire aux deux bases.

• **Volume à bases polygonales parallèles**

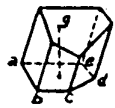
$V = \frac{h}{6}\,(B + B' + 4\,B'')$.

h = distance entre les deux bases.
B et B' = surface des deux bases.
B" = surface de la section parallèle aux bases, passant par le milieu de h.



• **Prisme à deux bases obliques**

$V = abcde \times h$
abcde = surface d'une base.
h = distance du centre de gravité de l'autre base au plan de la première.

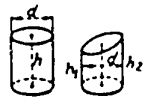


• **Cylindre**

– Cylindre droit : $V = \frac{\pi d^2}{4} h$

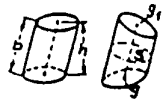
– Cylindre droit à section oblique :

$V = \frac{\pi d^2}{4} \times \frac{h_1 + h_2}{2}$



– Cylindre oblique à bases parallèles : V = S'h
S' = surface de la base
h = distance des deux bases

– Cylindre à bases obliques quelconques
$V = S \times gg_1$ (S = section droite)
gg_1 = distance des centres de gravité des bases.



• **Pyramide et tronc de pyramide à bases parallèles**

– Pyramide
B = surface de la base
h = distance du sommet au plan de la base

$V = \frac{1}{3} B \times h$

– Tronc de pyramide à bases parallèles
B et b = surfaces des bases

$V = \frac{1}{3} h(B + b + \sqrt{Bb})$

h = distance entre les plans des bases

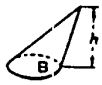
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

• **Cône et tronc de cône**

– Cône circulaire droit
$S = \pi R\, l$

– Cône circulaire, droit ou oblique : $V = \pi r^2 \frac{h}{3}$

Cône non circulaire, droit ou oblique : $V = B \times \frac{h}{3}$



Dans les deux cas, h = distance du sommet au plan de la base.

– Tronc de cône à bases parallèles :

$V = \frac{1}{3} h(B + b + \sqrt{Bb})$

B et b = surfaces des bases
h = distance entre plans des bases

• **Sphère, secteur sphérique, segment sphérique, zone sphérique**

– **Sphère :**

Surface totale $= 4 \pi r^2$

Volume $V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{\pi d^3}{6}$

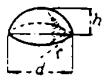
– Secteur sphérique :

Surface totale $= \frac{\pi r}{2}(4h + d)$

Volume $= \frac{2}{3}\pi r^2 h = 2{,}0944\, r^2 h$

– Segment sphérique

Surface latérale $= 2 \pi rh$



$= \frac{\pi}{4}(d_2 + 4h^2)$

Volume $V = \pi h^2 (r - \frac{1}{3}h)$

$= \pi h (\frac{d^2}{8} + \frac{h^2}{6})$

– Zone sphérique :

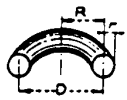
Surface latérale $= 2 \pi rh$

Volume

$V = \frac{1}{6}\pi h (3 R_1^2 + 3 R_2^2 + h^2)$

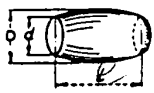
• **Tore circulaire**

Surface $S = 4 \pi^2 R.r.$
Volume $V = 2 \pi^2 r^2 R.$



• **Tonneau**

Volume approximatif
$V = 0{,}262\, l\, (2 D^2 + d^2)$



• **Ellipsoïde de révolution**

$V = \frac{4}{3}\pi a^2 b$ ou $V = \frac{4}{3}\pi ab^2$

suivant que la révolution s'effectue autour du petit axe ou du grand axe.

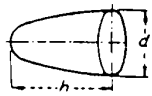
a = 1/2 grand axe
b = 1/2 petit axe

• **Ellipsoïde à trois axes**

$V = \frac{4}{3}\pi abc$

• **Paraboloïde de révolution**

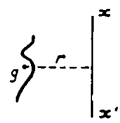
$V = \frac{\pi d^2 h}{8}$



• **Surface engendrée par une courbe plane tournant autour d'un axe situé dans son plan et ne le coupant pas**

Surface $S = 2 \pi rl$

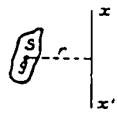
l = longueur développée de la courbe
r = rayon du cercle décrit par le centre de gravité



• **Volume engendré par une surface tournant autour d'un axe situé dans son plan et ne le coupant pas**

Volume $V = 2 \pi rS$

S = surface
r = rayon du cercle décrit par le centre de gravité



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.4. FACTEURS USUELS DANS LES CALCULS

π	3,14159	$\sqrt{\frac{1}{2\pi}}$	0,39894
$\lg\pi$	0,49715		
2π	6,28318		
3π	9,42478		
$\frac{\pi}{2}$	1,57080	$\sqrt{\frac{3}{2\pi}}$	0,69099
$\frac{\pi}{3}$	1,04720	$\sqrt{\frac{2}{\pi}}$	0,79788
$\frac{\pi}{5}$	0,62832	π^2	9,86960
$\frac{1}{\pi}$	0,31831	π^3	31,00628
$\frac{2}{\pi}$	0,63662	$\sqrt{\pi}$	1,77245
$\frac{3}{\pi}$	0,95493	$\sqrt{2}$	1,41421
$\sqrt{\pi}$	1,77245	$\sqrt{3}$	1,73205
$\frac{1}{\sqrt{\pi}}$	0,56418	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	0,57735
		$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0,70710

Logarithmes

e = base des logarithmes népériens

$$\ln a = \frac{\lg a}{\lg e}$$

$e = 2{,}718282$

$\lg e = 0{,}43429$

$\frac{1}{e} = 0{,}367879$

$\frac{1}{\lg e} = 2{,}30259$

2.5. STATISTIQUES

Le symbole (–) placé au-dessus d'une expression en signifie la moyenne.

2.5.1. Définitions

- **Somme**

Soit N valeurs $X_1, X_2, ..., X_j, ... X_n$

$$\text{Somme } \sum_{j=1}^{N} X_j = X_1 + X_2 + ... X_j ... X_n = \Sigma X$$

- **Moyenne arithmétique**

$$\bar{X} = \frac{\Sigma X}{N}$$

- **Moyenne arithmétique pondérée**

$$\bar{X} = \frac{W_1 X_1 + W_2 X_2 + ... + W_n X_n}{W_1 + W_2 + ... W_n} = \frac{\Sigma WX}{\Sigma W}$$

- **Médiane**

La médiane d'un ensemble de nombres rangés par ordre de grandeur croissante est la valeur du milieu, ou la moyenne arithmétique des deux valeurs centrales (cas d'un nombre pair de valeurs).

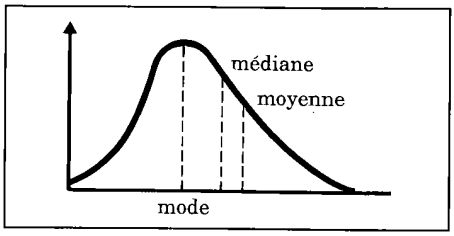
- **Mode**

Le mode d'un ensemble de nombres est le nombre que l'on rencontre le plus fréquemment, c'est-à-dire celui qui a la plus

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

grande fréquence. Le mode peut ne pas exister ou ne pas être unique.

Relation empirique entre la moyenne, la médiane et le mode



Pour des courbes de densité unimodale modérément asymétrique, on a la relation empirique suivante :

Moyenne − Mode = 3 (Moyenne − Médiane)

- **Moyenne géométrique G**

$$G = \sqrt[N]{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \ldots\ldots \cdot X_N}$$

- **Moyenne harmonique H**

$$H = \frac{N}{\Sigma \frac{1}{X}}$$

- **Moyenne quadratique MQ**

$$MQ = \sqrt{\frac{\Sigma X^2}{N}}$$

- **Écart moyen EM**

$$EM = \frac{\sum_{j=1}^{N} \left| X_j - \overline{X} \right|}{N} = \frac{\Sigma \left| X - \overline{X} \right|}{N} = \left| X - \overline{X} \right|$$

- **Écart type s**

Pour n nombres :

si $x = X - \overline{X}$ (écart du nombre avec la moyenne $\overline{X}$)

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma x^2}{n}}$$

- **Variance V**

C'est le carré de l'écart–type.

$V = s^2$

2.5.2. Propriété de l'écart-type

Pour une distribution normale, ou distribution de Laplace-Gauss (figure 216), il apparaît que :

± 68,27 % des cas sont compris entre $\overline{X} - s$ et $\overline{X} + s$

± 95,45 % des cas sont compris entre $\overline{X} - 2s$ et $\overline{X} + 2s$

± 99,73 % des cas sont compris entre $\overline{X} - 3s$ et $\overline{X} + 3s$.

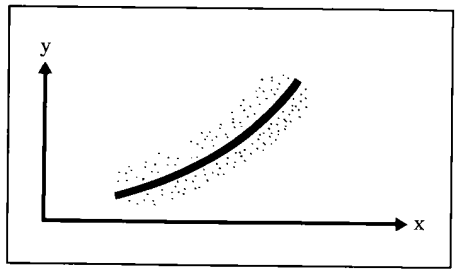
Ces pourcentages sont approximativement valables pour des distributions légèrement dissymétriques.

Pour des distribution légèrement dissymétriques, on a la relation empirique :

$$\text{Écart moyen} = \frac{4}{5} \text{ (écart-type)}$$

2.5.3. Méthode graphique d'ajustement d'une courbe

A partir d'un diagramme de dispersion (figure ci-dessous), on peut souvent représenter une courbe continue approchant les données. Une telle courbe est appelée courbe d'ajustement.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

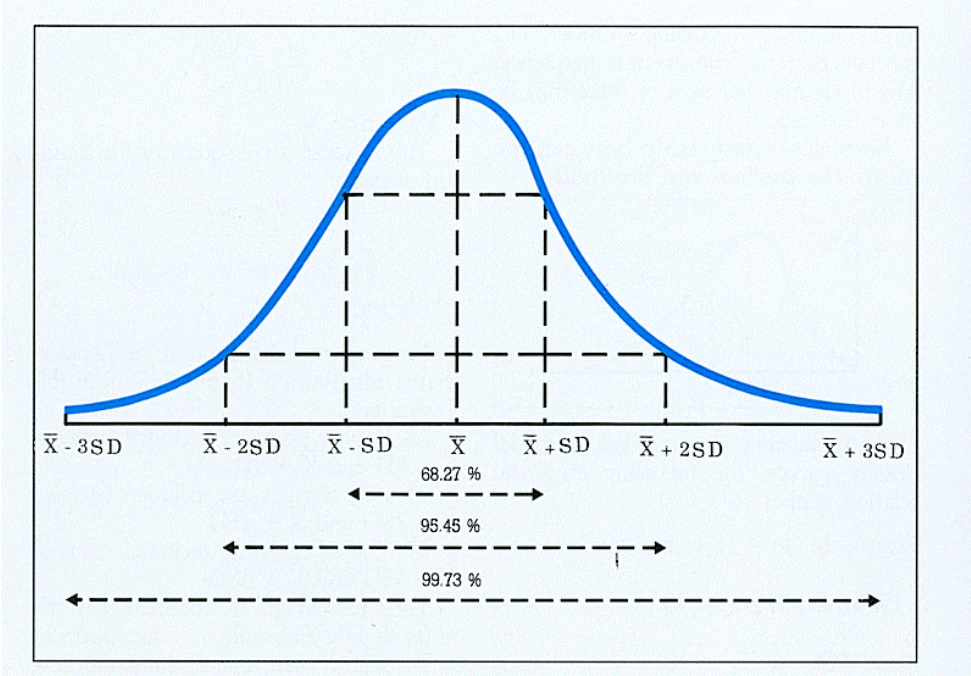


Figure 217. Distribution normale (Laplace-Gauss).

2.5.3.1. Méthodes des moindres carrés

- **Définition**

Parmi toutes les courbes qui approchent un ensemble de données, celle qui donne le meilleur ajustement est celle qui vérifie la propriété suivante (figure 218):

$D_1^2+D_2^2+\ldots+D_N^2$ minimum

On l'appelle la courbe des moindres carrés.

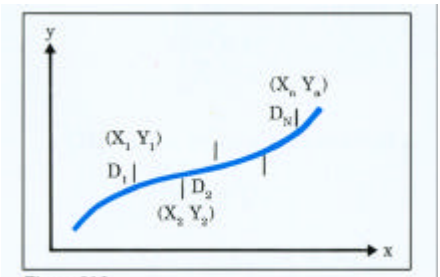


Figure 218.

- **Droite de régression des moindres carrées**

Soit un nuage de N points

$(X_1, Y_1); (X_2, Y_2); \ldots (X_N, Y_N)$

(1) $Y = a_o + a_1X$ (2) $X = b_o + b_1Y$

$$a_o = \frac{(\Sigma Y)(\Sigma X^2) - (\Sigma X)(\Sigma XY)}{N\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2}$$

$$a_1 = \frac{N\Sigma XY - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{N\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2}$$

(Pour obtenir les coefficients b_0 et b_1, remplacer dans les formules précédentes a par b, dans les formules précédentes a par b, X par Y et Y par X).

En posant $x=\xi-X$ et $y = Y-\varphi$, on peut également écrire les équations (1) et (2) sous la forme:

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

$$y = \left(\frac{\Sigma xy}{\Sigma x^2}\right) x$$

$$x = \left(\frac{\Sigma xy}{\Sigma y^2}\right) y$$

- **Parabole des moindres carrés**

Soit un nuage de N points :

$$(X_i, Y_i) ; 1 \leqslant i \leqslant N$$

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2$$

Pour obtenir les coefficients a_0, a_1, a_2, il faut résoudre le système d'équation suivant :

$$\Sigma Y = a_0 N + a_1 \Sigma X + a_2 \Sigma X^2$$

$$\Sigma XY = a_0 \Sigma X + a_1 \Sigma X^2 + a_2 \Sigma X^3$$

$$\Sigma X^2 Y = a_0 \Sigma X^2 + a_1 \Sigma X^3 + a_2 \Sigma X^4$$

2.5.3.2. Écart-type lié (ou erreur quadratique moyenne)

Soit Y_{est} la valeur estimée de Y à partir de (1), on définit une mesure de la dispersion autour de la droite de régression de Y en X par la quantité.

$$S_{Y.X} = \sqrt{\frac{\Sigma (Y - Y_{est})^2}{N}}$$

que l'on appelle écart-type de Y lié à X.

Forme utilisée pour le calcul :

$$S^2_{Y.X} = \frac{\Sigma Y^2 - a_0 \Sigma Y - a_1 \Sigma XY}{N}$$

2.5.3.3. Variation expliquée et résiduelle. Coefficient de corrélation

a) La variation totale de Y, $\Sigma (Y - \overline{Y})^2$ peut s'écrire :

$$\Sigma (Y - \overline{Y})^2 = \Sigma (Y - Y_{est})^2 + \Sigma (Y_{est} - \overline{Y})^2$$

$\Sigma (Y - Y_{est})^2$ = variation résiduelle.

$\Sigma (Y_{est} - \overline{Y})^2$ = variation expliquée.

b) On appelle coefficient de détermination, le rapport de la variation expliquée et de la variation totale, on l'écrit :

$$r^2 = \frac{\Sigma (Y_{est} - \overline{Y})^2}{\Sigma (Y - \overline{Y})^2} \qquad 0 \leqslant r^2 \leqslant 1$$

La quantité r, racine de l'expression précédente est appelée coefficient de corrélation.

r est un nombre sans dimension et varie entre − 1 et + 1.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. CHIMIE ET RÉACTIFS

3.1. RAPPEL DE NOTIONS DE CHIMIE

On appelle **corps pur**, une substance dont les constantes physiques sont identiques quelle que soit la taille de l'échantillon pris.

La molécule est la plus petite partie d'un corps pur ayant toutes les propriétés physiques et chimiques de celui-ci.

Une molécule peut être dissociée par des moyens chimiques. L'énergie mise en oeuvre est forte. La molécule est formée

- d'atomes identiques pour un corps pur simple ou,
- d'atomes différents pour un corps pur composé.

Les principales **particules élémentaires d'un atome** sont **l'électron**, le **proton**, le **neutron**

- **l'électron** est une particule de charge électrique négative, - e = - 1,6 10^{19} coulomb. Sa masse au repos est de 9, 107.10^{-31} kg. L'électron possède un moment angulaire (spin) par suite de sa rotation autour de son axe; il en résulte un moment magnétique dipolaire responsable des propriétés de la plupart des substances para et ferromagnétiques;
- **le proton** est une particule électrisée positivement, (+ e = + 1,6 10^{-19} coulomb) dont la masse est 1836 fois celle de l'électron;
- **le neutron** est une particule électriquement neutre dont la masse est sensiblement égale à celle du proton.

L'atome est un assemblage de particules élémentaires de diamètre de l'ordre de 0,1 à 0,5 manomètre. Il comporte

- un **noyau** contenant Z protons et N neutrons. Sa charge électrique est Ze^{+}. Sa dimension est de 10^{-5} manomètre environ. Le terme nucléon est utilisé pour désigner soit le proton, soit le neutron. Le noyau, partie lourde de l'atome, est chimiquement stable
- un nuage de Z **électrons**, de charge électrique: - Ze.

Dans un atome électriquement neutre, les électrons attirés par le noyau sont en mouvement rapide dans un espace de quelques fractions de manomètre autour de celui-ci et occupent des positions énergétiques quantifiées. Ils peuvent passer d'un niveau énergétique à un autre par absorption ou émission d'un photon.

Un **photon** est un quantum d'énergie, c'est-à-dire qu'il transporte un "grain" d'énergie. Si v est la fréquence d'un rayonnement, l'énergie du photon associé est E = hv.

h constante de Planck $\simeq$ 6,63 10^{-34} J.s.

3.1.1. Numéro atomique, isotopes

On appelle **numéro atomique** le nombre de protons dans le noyau et **nombre de masse A** la somme Z + N (nombre de nucléons du noyau).

La masse atomique est égale au nombre de masse multiplié par la masse du nucléon.

Deux atomes d'un même élément chimique ne différant que par le nombre de neutrons sont dits **isotopes**.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Des atomes isotopes ont les mêmes propriétés chimiques parce qu'ils ont le même nombre d'électrons. Seule leur cinématique est différente. Ainsi, l'ensemble des atomes pour lesquels Z = 8 constituent l'élément oxygène.

On distingue les isotopes en écrivant leur nombre de nucléons A en haut et à gauche du symbole de l'atome

Ex: 1H hydrogène léger,

2H hydrogène lourd (deuterium),

3H tritium,

^{35}Cl et ^{37}C1.

3.1.2. Masse atomique des éléments

- Mole

La masse d'un atome est égale, avec une approximation suffisante en chimie classique à la somme des masses des nucléons. Ces masses étant très petites, et donc d'emploi peu commode, il a été convenu de partir de la masse d'un certain nombre d'atomes. Le nucléide ^{12}C a été choisi comme élément de base (14e Conférence Générale des Poids et Mesures 1971).

La mole est, par définition la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 12 g de carbone ^{12}C (son symbole est "mol").

Le nombre d'atomes contenus dans une mole d'un élément est de $6{,}023.10^{23}$ (nombre d'Avogadro).

La masse d'une mole de carbone ^{12}C est de 12 g exactement, celle d'une mole d'atomes de chlore est de 35,453 g; la quantité de matière contenue dans 1 kg d'H_2O est de 55,533 mol.

On définit la masse molaire d'un corps comme étant le quotient de la masse de ce corps par la quantité de matière qu'il contient: elle s'exprime en gramme par mole ($g.mol^{-1}$). L'usage s'est répandu de l'exprimer en dalton. Le dalton est la masse de l'isotope ^{1}H

Les propriétés des éléments chimiques ne sont pas quelconques, mais dépendent de la structure électronique de l'atome: deux atomes différents ayant leurs couches périphériques identiques ont des propriétés chimiques voisines (familles des alcalins, des halogènes, etc.). Le tableau de Mendeleieff, ou classification périodique des éléments (cf. figure 219), rend compte de ces analogies.

3.1.3. Formule des composés

Les corps composés sont représentés par des formules obtenues avec les symboles des éléments qui les constituent Lorsque les nombres d'atomes diffèrent pour les éléments du composé, ces symboles sont affectés d'indices entiers représentant les proportions des divers atomes. Ces chiffres sont inscrits en bas à droite des symboles: H_2O, deux atomes d'hydrogène pour un d'oxygène.

Le tableau 54 donne la masse molaire des principaux sels utilisés en traitement des eaux.

Pour les corps organiques, on utilise souvent une formule qui indique comment certains groupes d'atomes sont associés dans la molécule. Ainsi, on écrit l'acide acétique CH_3COOH pour montrer qu'il y a un groupe CH_3 fixé sur un atome de carbone portant également un atome d'oxygène et un groupe OH.

3.1.4. Règles pour l'écriture des formules

Les règles complètes concernant la Nomenclature de Chimie Inorganique ont été publiées par la Société Chimique de France (février 1975). Quelques paragraphes fondamentaux en sont rappelés ci-après

- **(§ 2.15)** ; dans les formules, le constituant électropositif (cation) doit toujours

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

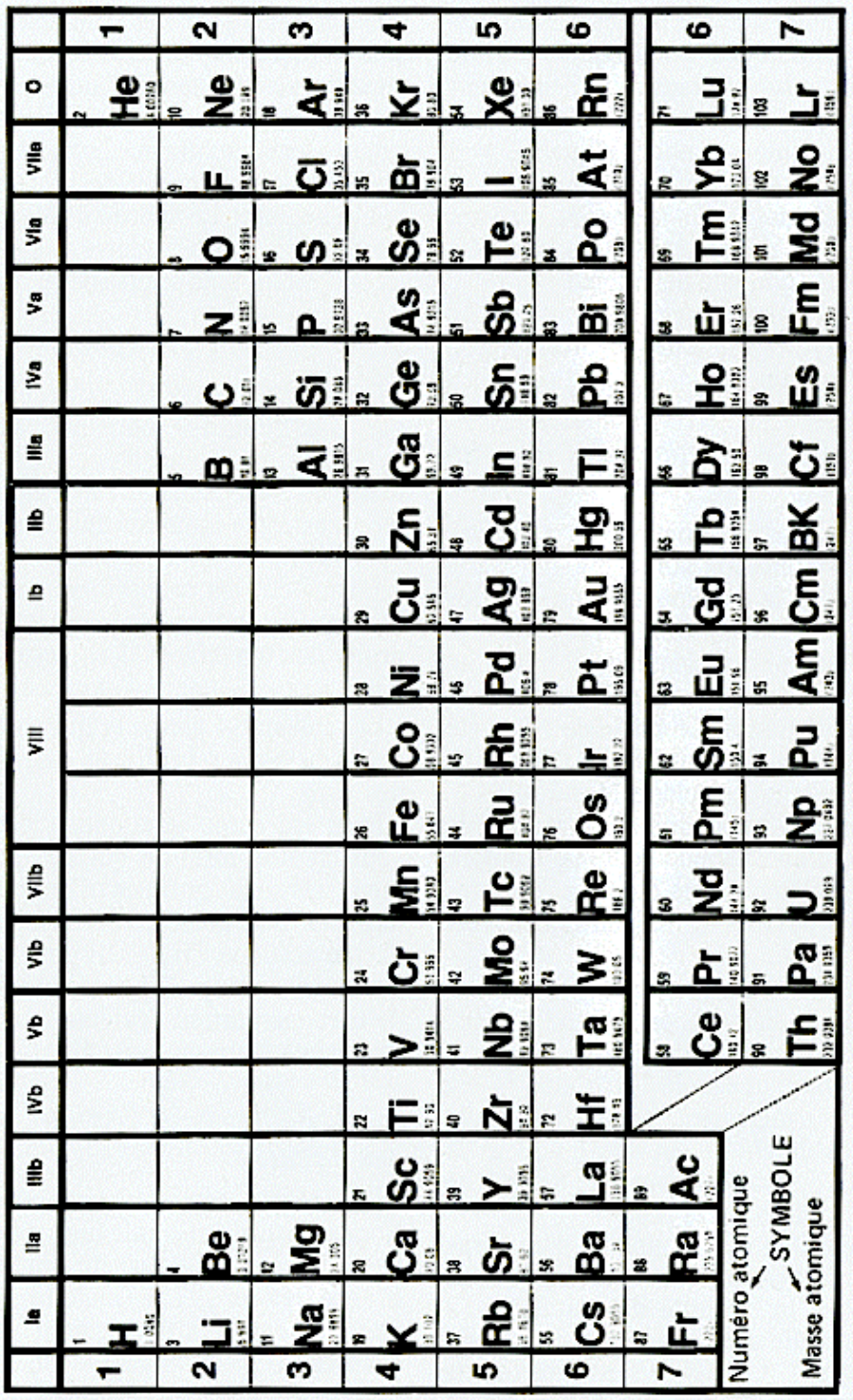


Figure 219. Classification périodique des éléments.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

être placé le premier, exemple KCI, $CaSO_4$. Si le composé contient plus d'un constituant électropositif ou électronégatif, la séquence à l'intérieur de chaque classe devrait être celle de l'ordre alphabètique des symboles. Les acides sont traités comme des sels d'hydrogène, par exemple H_2SO_4 et H_2PtCI_6 ; pour la place de l'hydrogène, voir 6.2 et 6.32.3.

- **(§ 2.16.1)** ; dans le cas de composés binaires entre éléments non métalliques, le constituant à placer en tête est celui qui figure le premier dans la liste suivante: B, Si, C, Sb, As, P, N, H, Te, Se, S, At, I, Br, Cl, 0, F.

Exemple: NH_3, H_2S, SO_2, ClO_2, OF_2.

- **(§ 6.2)** ; sels contenant des atomes d'hydrogène acide.

Les noms de ces sels se forment en ajoutant le préfixe hydrogéno au nom de l'anion pour indiquer la présence dans ce sel de l'hydrogène substituable. De tels sels ne peuvent naturellement pas être appelés des sels acides. **Exemples**

$NaHCO_3$: hydrogénocaxbonate de sodium, LiH_2PO_4: dihydrogénophosphate de lithium,

KHS : hydrogénosulfure de potassium.

- **(§ 6.3)** ; sels doubles, triples.
- **(§ 6.31)** ; cations: dans les formules, tous les cations doivent précéder les anions.
- **(§ 6.32.1)** ; les cations autres que l'hydrogène doivent être cités par ordre alphabétique, ordre qui peut être différent dans les formules et dans les noms. Exemple: $KNaCO_3$: carbonate de potassium et de sodium
- **(§ 6.32.3);** hydrogène acide : l'hydrogène est écrit le dernier parmi les cations lorsque la règle 6.2 n'est pas appliquée. **Exemple:** $NaNH_4HPO_4$, 4 H_20 : hydrogénophosphate d'ammonium et de sodium à 4 molécules d'eau.
- **(§ 6.33)** ; anions: les anions doivent être écrits par ordre alphabétique, ordre qui peut être différent dans les formules et dans les noms.

3.1.5. Évaluation des concentrations

3.1.5.1. Emploi du milli-équivalent

Pour faciliter les calculs, on a pris l'habitude d'évaluer les résultats des analyses non pas en grammes par litre mais en équivalents grammes par litre. Le sous multiple est le milli-équivalent ($meq.l^{-1}$). Voir page 16.

Par exemple, la masse molaire du chlore étant de 35,5 g, si une eau contient 2 g de chlore par litre, on peut exprimer ce résultat en écrivant qu'elle contient

$$\frac{2 \times 1}{35,5} = 0,056$$

équivalent-gramme de chlore par litre (56 $meq.l^{-1}$).

S'il s'agit d'un élément polyvalent, l'unité de concentration ($meq.l^{-1}$) a pour valeur, exprimée en $mg.l^{-1}$, la masse molaire divisée par la valence. Par exemple, pour le calcium, élément bivalent dont la masse molaire est 40 g, une concentration d'un $meq.l^{-1}$ correspond à

$$\frac{40}{2} = 20 \text{ mg.l}^{-1}$$

L'avantage de cette notation est de permettre le calcul immédiat des concentrations salines. Si, dans l'exemple précédent d'une eau contenant 56 milli-équivalents de chlore par litre, il s'agit d'une solution pure de chlorure de calcium, la concentration en CaCl2 est

$$0,056 \left(\frac{40}{2} + \frac{35,5}{1}\right) = 3,1 \text{ g.l}^{-1}$$

et la dose de calcium correspondante de :

$$0,056 \times \frac{40}{2} = 1.1 \text{ g.l}^{-1}$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau *54*. Masse molaire des principaux sels cristallisés.

Corps	Formule	Masse molaire g.mol
Aluminium sulfate	$Al_2 (SO_4)_3$, 18 H_20	666,4
Ammonium nitrate	$NH_4 NO_3$	80,0
- nitrite	$NH_4 NO_2$	64,0
- sulfate	$(NH_4)_2 SO_4$	132,1
Argent chlorure	AgCI	143,3
Baryum hydroxyde (Baryte)	Ba $(OH)_2$, 8 H_20	315,5
- sulfate	Ba SO_4	233,0
- chlorure	Ba Cl_2, 2 H_20	244,3
Calcium carbonate	Ca CO_3	100,1
- hydrogénocarbonate	Ca $(HCO_3)_2$	162,1
- chlorure	Ca Cl_2, 6 H_20	219,1
- sulfate	Ca SO_4, 2 H_20	172,2
Cuivre sulfate	CU SO_4, 5 H_20	249,7
Fer chlorure (ferrique)	Fe $C1_3$, 6 H_20	270,3
- sulfate (ferreux)	Fe SO_4, 7 H_20	278,0
- - (ferrique)	$Fe_2 (SO_4)_3$, 9 H_20	562,0
Magnésium carbonate	Mg CO_3	84,3
- chlorure	Mg $C1_2$, 6 H_20	203,3
- sulfate	Mg SO_4, 7 H_20	246,5
Manganèse hydroxyde (manganeux)	Mn $(OH)_2$,	89,0
- carbonate	Mn CO_3	115,0
Plomb carbonate	Pb CO_3	267,2
- sulfate	Pb SO_4	303,2
Potassium nitrate	K NO_3	101,1
- permanganate	K MnO_4	158,0
- phosphate	K_3 PO_4	212,3
Sodium aluminate	Na_2 $A1O_4$	13 7
- hydrogénocarbonate	Na HCO_3	84
- carbonate	Na_2 CO_3	106,0
- -	Na_2 CO_3, 10 H_2O	286,1
- chlorure	Na Cl	58,4
- monohydrogénophosphate	Na_2 HPO_4, 12 H_2O	358,1
- orthophosphate	Na_3 PO_4, 12 H_2O	380,1

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

On a très souvent besoin de connaître non pas le détail des différents sels dissous, mais le bilan des anions et des cations. La notation en équivalents permet immédiatement d'avoir une idée de ce bilan.

3.1.5.2. Emploi des degrés

La notion d'équivalent et de milli-équivalent a l'avantage d'être internationale, mais l'emploi du degré demeure fréquent pour la définition du degré ainsi que celui du ppm de $CaCO_3$ (0,02 milli-équivalent par litre).

Tableau 55. Concentration de solutions

	Formule	Masse Molaire	Valeur des différentes unités en $mg.l^{-1}$		
			Milli-équivalent.l^{-1}	Degré français	$CaCO_3$ ppm
1) Sels et oxydes de calcium et de magnésium participant à la dureté de l'eau (titre hydrotimétrique)					
Carbonate de calcium	$CaCO_3$	100	50	10,0	1,00
Hydrogénocarbonate de calcium (bicarbonate de calcium)	$Ca(HCO_3)_2$	162	81	16,2	1,62
Sulfate de calcium	$CaSO_4$	136	68	13,6	1,36
Chlorure de calcium	$CaCl_2$	111	55,5	11,1	1,11
Nitrate de calcium	$Ca(NO_3)_2$	164	82	16,4	1,64
Chaux vive	CaCO	56	28	5,6	0,56
Chaux hydratée	$CA(OH)_2$	74	37	7,4	0,74
Carbonate de magnésium	$MgCO_3$	84	42	8,4	0,84
Hydrogénocarbonate (bicarbonate de magnésium)	$Mg(HCO_3)_2$	146	73	14,6	1,46
Sulfate de magnésium	$MgSO_4$	120	60	12,0	1,20
Chlorure de magnésium	$MgC1_2$	95	47,5	9,5	0,95
Nitrate de magnésium	$Mg(NO_3)_2$	148	74	14,8	1,48
Magnésie	MgO	40	20	4,0	0,40
	$Mg(OH)_2$	58	29	5,8	0,58
2) Anions					
Carbonate	CO_3	60	30	6,0	0,60
Hydrogénocarbonate (bicarbonate)	HCO_3	61	61	12,2	1,22
Sulfate	SO_4	96	48	9,6	0,96
Sulfite	SO_3	80	40	8,0	0,80
Chlorure	Cl	35,5	35,5	7,1	0,71
Nitrate	NO_3	62	62	12,4	1,24
Nitrite	NO_2	46	46	9,2	0,92
Orthophosphate	PO_4	95	31,6	6,32	0,63
Silicate exprime en SiO2	SiO_2	60	60	12,0	1,20

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

	Formule	Masse molaire	**Valeur des différentes unités** en $mg.l^{-1}$		
			Milli-équivalent.l^{-1}	Degré français	Ca CO_3 ppm
3) Acides					
Sulfurique	H_2SO_4	*98*	*49*	*9,8*	*0,98*
Chlorhydrique	HCl	*36,5*	*36,5*	*7,3*	*0,73*
Nitrique	HNO_3	*63*	*63*	*12,6*	*1,26*
Orthophosphorique	H_3PO_4	*98*	*32,7*	*6,5*	*0,65*
4) **Cations et oxydes**					
calcium	Ca	*40*	*20*	*4,0*	*0,40*
Magnésium	Mg	*24,3*	*12,1*	*2,4*	*0,24*
Sodium	Na	*23*	*23*	*4,6*	*0,46*
	Na_2O	*62*	*31*	*6,2*	*0,62*
Potassium	K	*39*	*39*	*7,8*	*0,78*
Fer (11)	Fe	*55,8*	*28*	*5,6*	*0,56*
Fer (III)	Fe	*55,8*	*18,6*	*3,7*	*0,37*
	Fe_2O_3	*159,6*	*26,6*	*5,3*	*0,53*
Aluminium	Al	*27*	*9*	*1,8*	*0,18*
	A1203	*102*	*17*	*3,4*	*0,34*
5) Bases					
Ammonium	NH_4	*18*	*18*	*3,6*	*0,36*
Soude	NaOH	*40*	*40*	*8,0*	*0,80*
Potasse	KOH	*56*	*56*	*11,2*	*1,12*
Ammoniaque	NH_4OH	*35*	*35*	*7,0*	*0,70*
6) Sels divers					
Hydrogénocarbonate (bicarbonate) de sodium	$NaHCO_3$	*84*	*84*	*16,8*	*1,68*
Carbonate de sodium	Na_2CO_3	*106*	*53*	*10,6*	*1,06*
Sulfate de sodium	Na_2SO_4	*142*	*71*	*14,2*	*1,42*
Chlorure de sodium	NaCI	*58,5*	*58,5*	*11,7*	*1,17*
Orthophosphate de sodium	Na_3PO_4	*164*	*54,7*	*10,9*	*1,09*
Silicate de sodium	Na_2SiO_3	*122*	*61*	*12,2*	*1,22*
Carbonate de potassium	K_2CO_3	*138*	*69*	*13,8*	*1,38*
Hydrogénocarbonate (bicarbonate) de potassium	$KHCO_3$	100	100	*20*	*2,00*
Sulfate de potassium	K_2SO_4	*174*	*87*	*17,4*	*1,74*
Chlorure de potassium	KCl	*74,5*	*74,5*	*14,9*	*1,49*
Sulfate ferreux	$FeSO_4$	*152*	*76*	*15,2*	*1,52*
Sulfate ferrique	$Fe_2(SO_4)_3$	*400*	*66,6*	*13,3*	*1,33*
Chlorure ferrique	$FeC1_3$	*162,5*	*54,2*	*10,8*	*1,08*
Sulfate d'aluminium	$Al_2(SO_4)_3$	*342*	*57*	*11,4*	*1,14*
Chlorure d'aluminium	$AICI_3$	*133,5*	*44,5*	*8,9*	*0,89*
Permanganate de potassium	$KMnO_4$	*158*	*158*	*31,6*	*3,16*

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2. CONSTANTES CARACTÉRISTIQUES DE SOLUTION

3.2.1. Densités

					Ammoniaque	
Densité	H_2SO_4	HCI	HNO_3	NaOH	Densité	NH_3
1,000	1,2	2	1,6	0,8	0,998	4,5
1,005	8,4	12	10,7	5	0,996	10
1,010	15,7	22	20,0	10	0,994	13,6
1,015	23	32	28	14	0,9915	19,8
1,020	31	42	38	19	0,990	22,9
1,025	39	53	47	23	0,9875	29,6
1,030	46	64	56	28	0,986	32,5
1,040	62	85	75	38	0,983	39,3
1,050	77	107	94	47	0,982	42,2
1,060	93	129	113	57	0,979	49
1,070	109	152	132	67	0,978	51,8
1,080	125	174	151	78	0,974	61,4
1,090	142	197	170	88	0,970	70,9
1,100	158	220	190	99	0,966	80,5
1,120	191	267	228	121	0,962	89,9
1,140	223	315	267	143	0,958	100,3
1,160	257	366	307	167	0,954	110,7
1,180	292	418	347	191	0,950	121
1,200	328	469	388	216	0,946	131,3
1,220	364		431	241	0,942	141,7
1,240	400		474	267	0,938	152,1
1,260	436		520	295	0,934	162,7
1,280	472		568	323	0,930	173;4
1,300	509		617	352	0,926	184,2
1,320	548		668	382	0,923	188
1,340	586		711	412	0,922	195,7
1,360	624		780	445	0,918	205,6
1,380	663		843	478	0,914	216,3
1,400	701		911	512	0,910	225,4
1,420	739		986	548	0,906	238,3
1,440	778		1 070	584	0,902	249,4
1,460	818		1163	623	0,898	260,5
1,480	858		1 270	662	0,894	271,5
1,500	897		1405	703	0,890	282,6
1,510	916		1 474	723		
1.520	936		1 508	744		
1,530	956			766		

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 56. Correspondance entre la densité et la concentration de solutions acides et basiques.
(grammes de produit pur par litre de solution à 15 °C).

Tableau 57. Correspondance entre la densité et la concentration de solutions salines (et du lait de chaux). (grammes de produit pur par litre de solution à 15 °C).

Densité	Sulfate d'aluminium $AI_2 (SO_4)_3 18 H_20$	Chlorure ferrique $FeCl_3$	Sulfate ferreux $FeSO_4 7 H_20$	Carbonate de sodium anhydre Na_2CO_3	Sel NaCI	Eau de Javel CI (env.)	Lait de chaux CaO (env.)
1,007	14	10,1	13,1	6,3	10,1	2,8	7,5
1,014	28	20	26,4	13,1	20,5	5,5	16,5
1,021	42	29	40,8	19,5	30,5	8	26
1,028	57	37	55,5	29	41	10,5	36
1,036	73	47	70,5	35,4	51	13,5	46
1,044	89	57	85,5	41,1	62	16	56
1,051	103	66	102	50,8	73	18,5	65
1,059	119	76	116,5	58,8	85	21	75
1,067	135	86	132	67,9	97	23	84
1,075	152	96	147	76,1	109	25	94
1,083	168	106	163	85,0	121	27,5	104
1,091	184	116	179	93,5	134	30	115
1,099	200	126	196	101,2	147	32	126
1,108	218	138	213	110,6	160	34	137
1,116	235	150	230	122	174	36	148
1,125	255	162	247	131	187	38	159
1,134	274	174	265	141,5	200	40	170
1,143	293	186	284	150,5	215		181
1,152	312	198	304	162,5	230		193
1,161	332	210	324		248		206
1,170	351	222	344		262		218
1,180	373	236	365		277		229
1,190	395	250	387		292		242
1,200	417	263	408		310		255
1,210	440	279	430				268
1,220	462	293	452				281
1,230	485	308	474				295
1,241	509	323	501				309
1,252	534	338					324
1,263	558	353					339
1,285	609	384					
1,308	663	416					
1,332	720	449					
1,357		483					
1,383		521					
1,411		561					
1,437		601					
1,453		626					
1,468		650					

Nota: l'eau de Javel, nom commercial de l'hypochlorite de sodium est caractérisée par sa teneur en chlore actif qui s'évalue en degré chlorométrique. 1° chlorométrique = 3,17 g de chlore actif par litre. 11 d'eau de Javel à 18° Cl. contient 5 7 g de Cl_2, actif. 1 1 d'eau de Javel à 48° Cl. contient 152 g de Cl_2, actif.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.2. Conductivité - Résistivité

La conductivité est mesurée par la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm' de surface, séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle augmente avec la teneur en sels dissous et varie en fonction de la température. La conductivité est exprimée en siemens (ou mhos). Sousmultiples: le millisiemens par cm et le microsiemens par cm (~tS.cW 1) ; cette dernière unité est la, plus utilisée en traitement d'eau.

La résistivité est l'inverse de la conductivité et est mesurée en ohms.cm(SQ.cm). La relation entre les deux mesures est la suivante

$$\text{Résistivité en ohms.cm} = \frac{10^6}{\text{conductivité en } \mu\text{S.cm}^{-1}}$$

Exemple: une conductivité de 10 µS.cm^{-1} correspond à une résistivité de 100 000 ohms.cm.

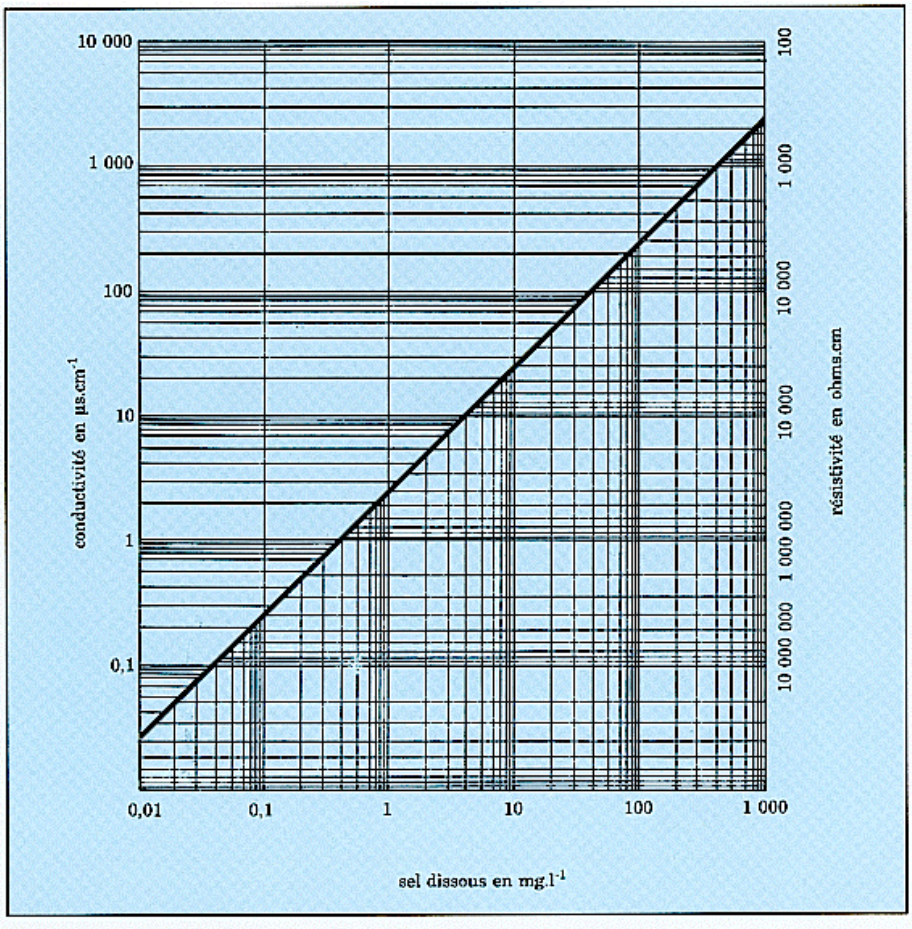


Figure 220. Conductivité en fonction de la salinité pour une solution de NaCl.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

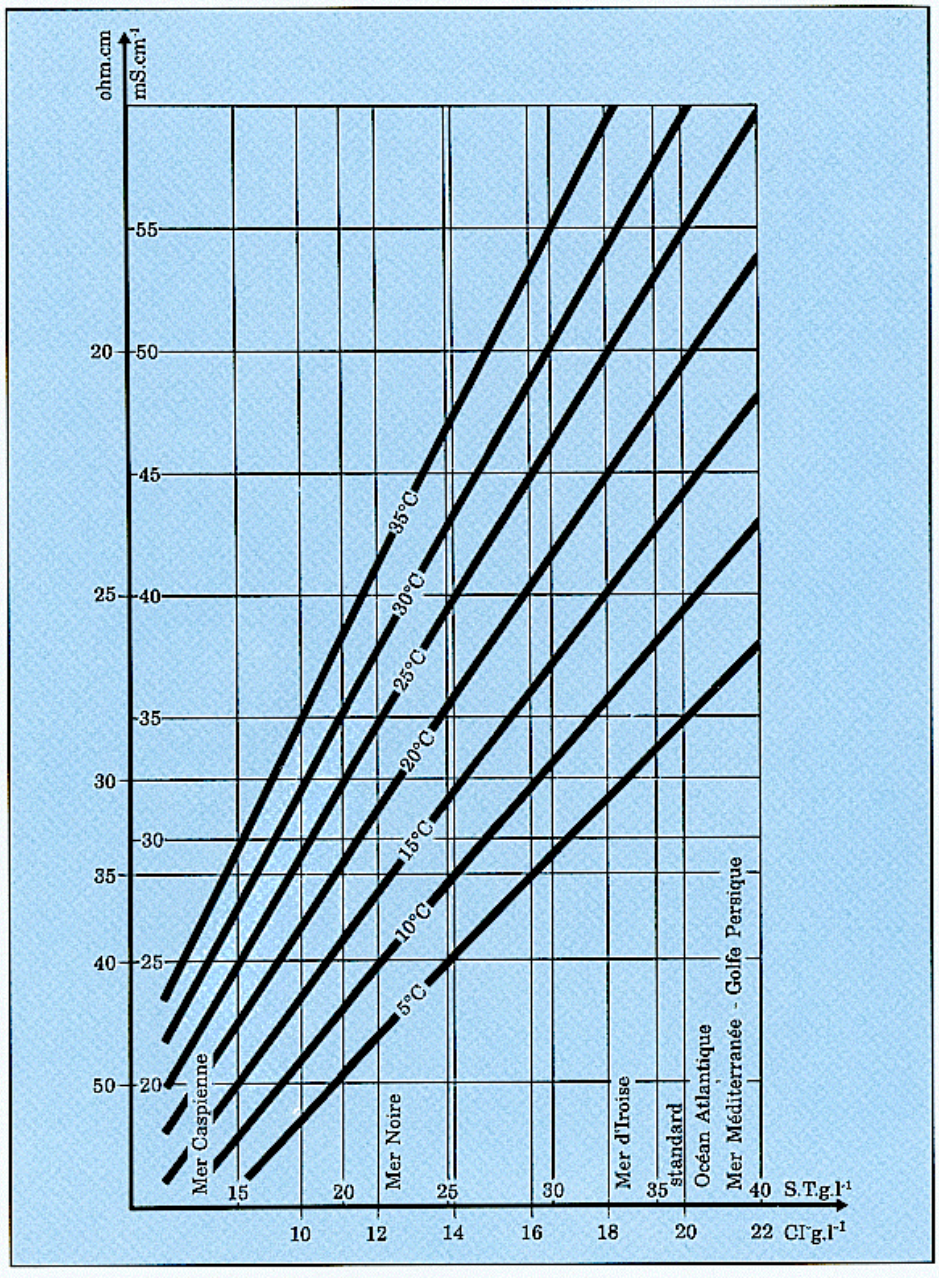


Figure 221. Conductivité de l'eau de mer.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

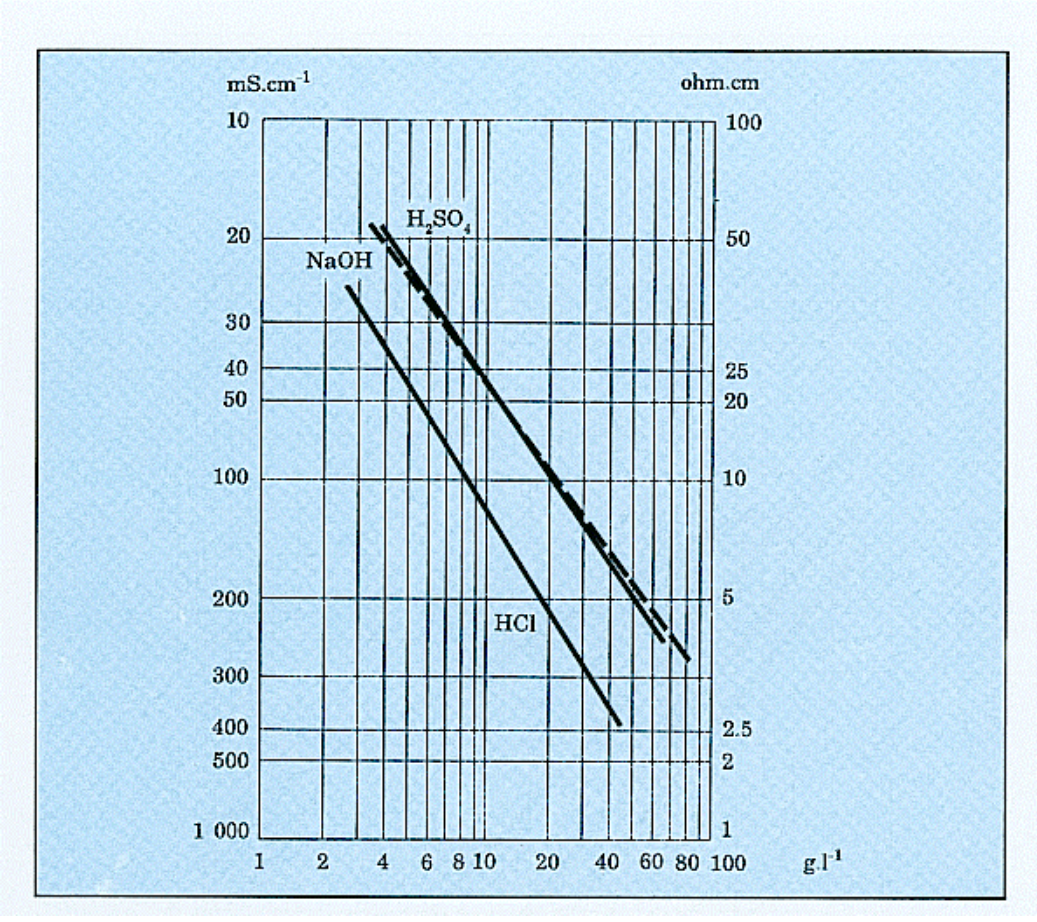


Figure 222. Conductivité des solutions d'acides et de soude.

- **Étalonnage des résistivimètres**

Les cellules de mesure de résistivité doivent être réétalonnées périodiquement avec des solutions N/50 ou N/100 de chlorure de potassium

$$\text{Constante de cellule } K = \frac{\text{Résistivité théorique}}{\text{Résistivité mesurée}}$$

Résistivité en O . cm		
Température °C	**KCI N/50**	**KCI N/100**
15	446	872
16	436	852
17	426	834
18	417	817
19	408	800
20	400	782
21	392	766
22	384	751
23	376	736
24	369	721
25	362	708

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

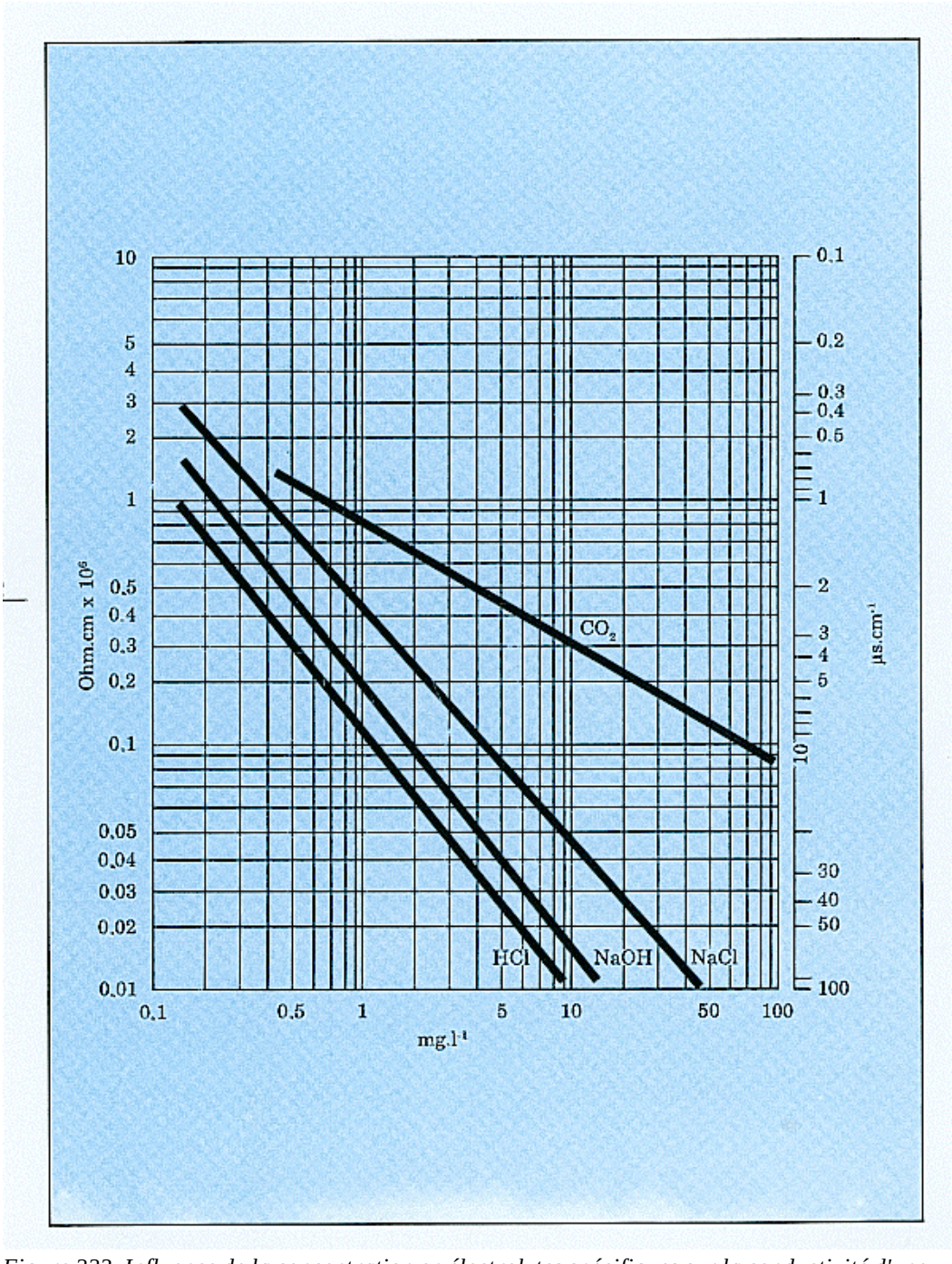


Figure 223. Influence de la concentration en électrolytes spécifiques sur la conductivité d'une eau (25°C)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

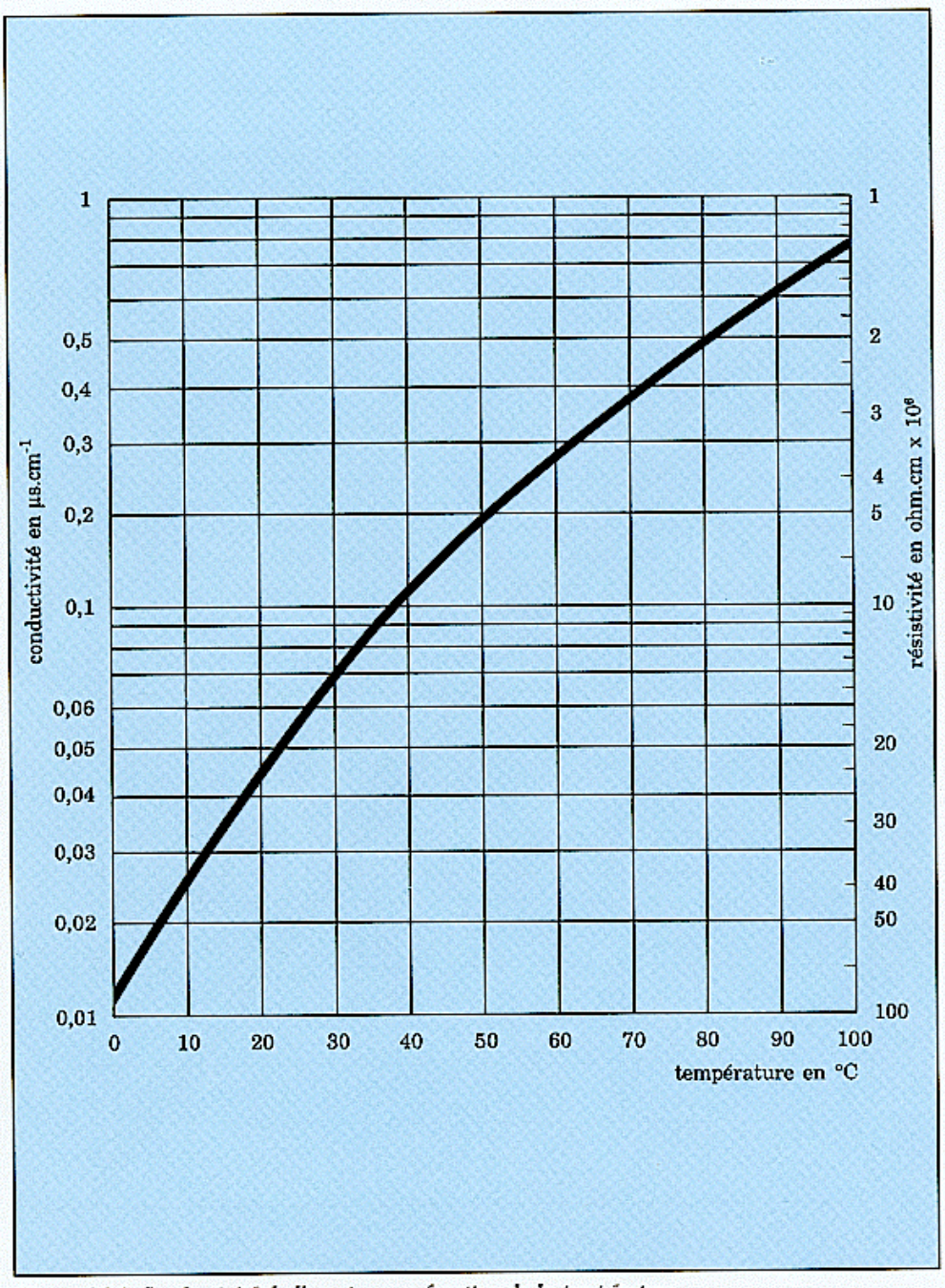


Figure 224. Conductivité de l'eau pure en fonction de la température.

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

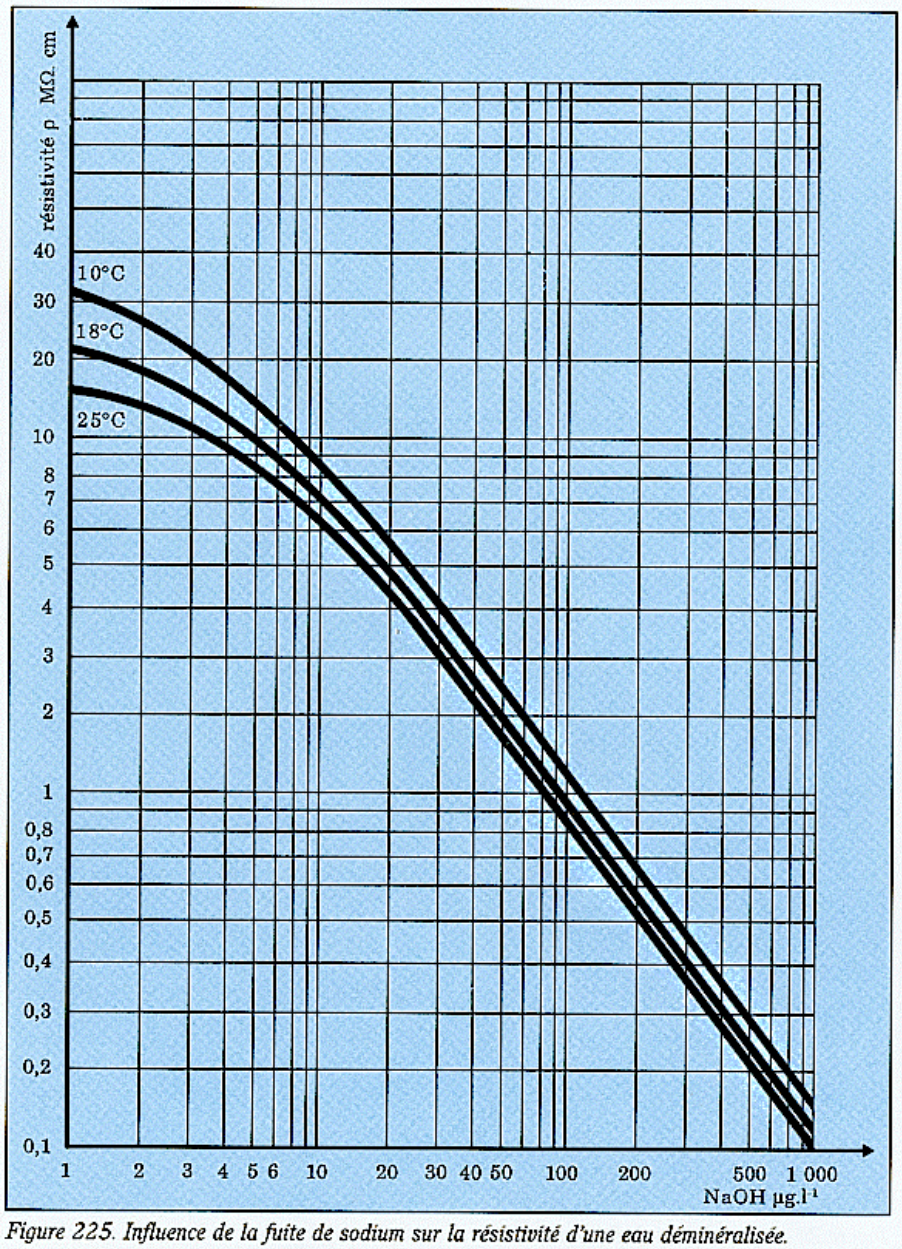


Figure 225. Influence de la fuite de sodium sur la résistivité d'une eau déminéralisée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.3. Viscosité cinématique de quelques liquides

Désignation	**Température (°C)**	**Viscosité cinématique v** $M^2.s^{-1}$
Eau	0	$1,8 .10^{-6}$
-	20	$1,0 .10^{-6}$
Saumure saturée de NaCI	0	$2,5 .10^{-6}$
-	10	$1,8 .10^{-6}$
Acide acétique 100 %	20	$1,2 .10^{-6}$
Acide nitrique 95 %	0	$1,5 .10^{-6}$
-	10	$1,2 .10^{6}$
Acide sulfurique 66 ° Bé	- 10	$4,4 .10^{-5}$
-	0	$2,6 .10^{-5}$
-	15	$1,7 .10^{-5}$
-	25	$1,3 .10^{-5}$
-	50	$6 .10^{-6}$
Acide chlorhyd. 20-21 ° Bé	- 10	$2,6 .10^{-6}$
-	0	$2,2 .10^{-6}$
-	10	$2,0 .10^{-6}$
-	20	$1,7 .10^{-6}$
Lessive de soude 49 %	15	$7,9 .10^{-5}$
-	20	$5,4 .10^{-5}$
-	25	$3,6 .10^{-5}$
Lessive de soude 41 %	15	$4,5 .10^{-5}$
-	20	$3,4 .10^{-5}$
-	25	$1,7 .10^{-5}$
Silicate de sodium 38-40 Bé	0	$5,5 .10^{-4}$
-	5	$2,9 .10^{-4}$
-	10	$2,05.10^{-4}$
-	20	$1,13.10^{-4}$
Sulfate d'aluminium 34 ° Bé	8	$1,38.10^{-5}$
Chlorure ferrique 45 ° Bé	- 15	$2,5 .10^{-5}$
-	0	$1,0 .10^{-5}$
-	20	$3,0 .10^{-6}$

NOTA: certains adjuvants de floculation ont une viscosité élevée à faire préciser par le fournisseur (voir § 3.5.7).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

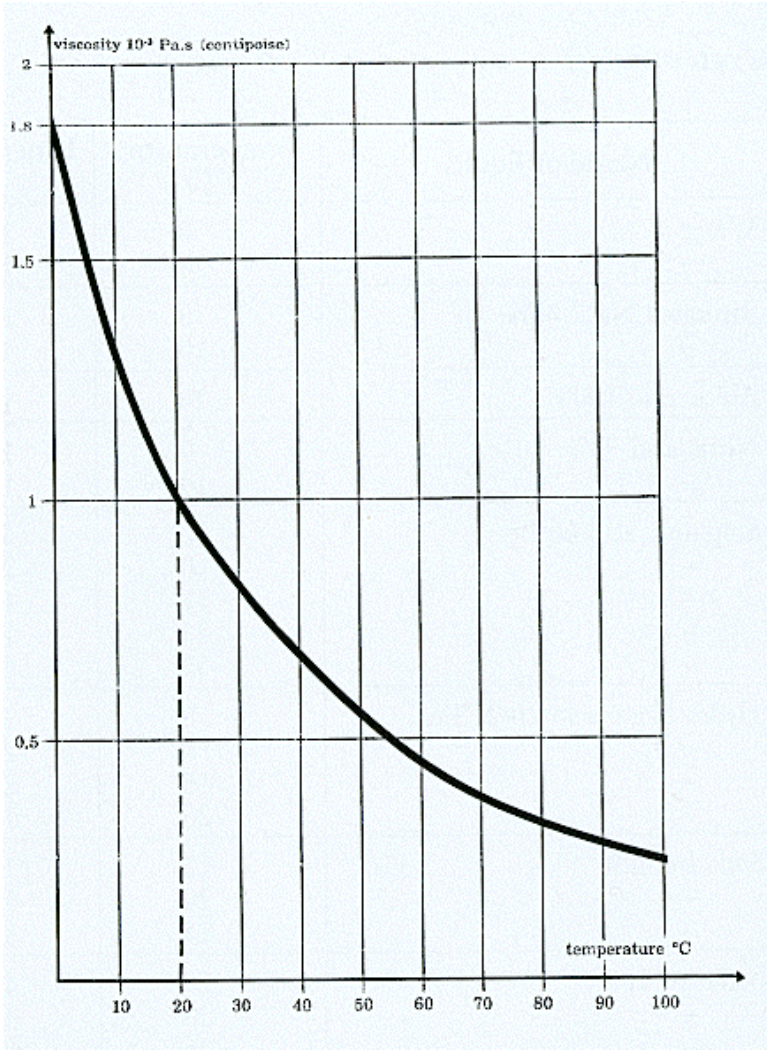


Figure 226. Viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température.

3.2.4. Solutions remarquables

3.2.4.1. Solubilités

- **Solubilité de la chaux**

Température °C	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**100**
CaO $g.l^{-1}$	1,40	1,33	1,25	1,16	1,06	0,97	0,88	0,80	0,71	0,64	0,5
$Ca(OH)_2$ $g.1^{-1}$	1,85	1,76	1,65	1,53	1,41	1,28	1,16	1,06	0,94	0,85	0,7
Titre de l'eau de chaux en degrés TAC	250	238	223	207	190	173	157	143	127	115	104

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Solubilité de quelques réactifs solides (1)**

(En grammes de substance correspondant à la formule, par litre d'eau.)

Corps	Formule (2)	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
Sulfate d'aluminium	$A1_2(SO_4)_3$,18 H_2O	636	659	688	728
Chlorure de calcium	$CaCI_2$	595	650	745	1020
Sulfate de calcium	$CaSO_4$ $2H_2O$	2,22	2,44	2,58	2,65
Sulfate de cuivre	$CuSO_4$, 5 H_2O	233	264	297	340
Chlorure ferrique	$FeCl_3$	744	819	918	-
	$FeC1_3$, 6 H_2O	852	927	1026	-
Sulfate ferreux	$FeSO_4$, 7 H_2O	282	331	391	455
Permanganate de potassium	$KMnO_4$	28	44	64	90
Phosphate d'ammonium	$NH_4H_2PO_4$	184	219	261	
	$(NH_4)_2H$ PO_4	364	386	408	
	$(NH_4)_2H$ PO_4, $2H_2O$	340	388		
Sulfate d'ammonium	$(NH_4)_2$ SO_4	413	420	428	
Carbonate de sodium	Na_2CO_3, 10 H_2O	250	305	395	568
Chlorure de sodium	NaCl	357	358	360	363
Fluorure de sodium	NaF	40	-	42,2	-
Bicarbonate de sodium	$NaHCO_3$	69	81,5	96	111
Phosphate monosodique	NaH_2PO_4, 2 H_2O	615	735	888	1101
Phosphate disodique	Na_2HPO_4, 12 H_2O	233	252	293	424
Phosphate trisodique	Na_3PO_4	15	41	110	200
	Na_3PO_4, 12 H_2O	231	257	326	416
Soude caustique	NaOH	420	515	1090	1190

1) Ces solubilités s'entendent pour des produits dissous dans l'eau en l'absence d'autres sels.

2) Quand un réactif sous sa forme commerciale a une formule différente de celle indiquée ci-dessus, sa solubilité doit être recalculée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

• **Solubilité du sulfate de calcium**

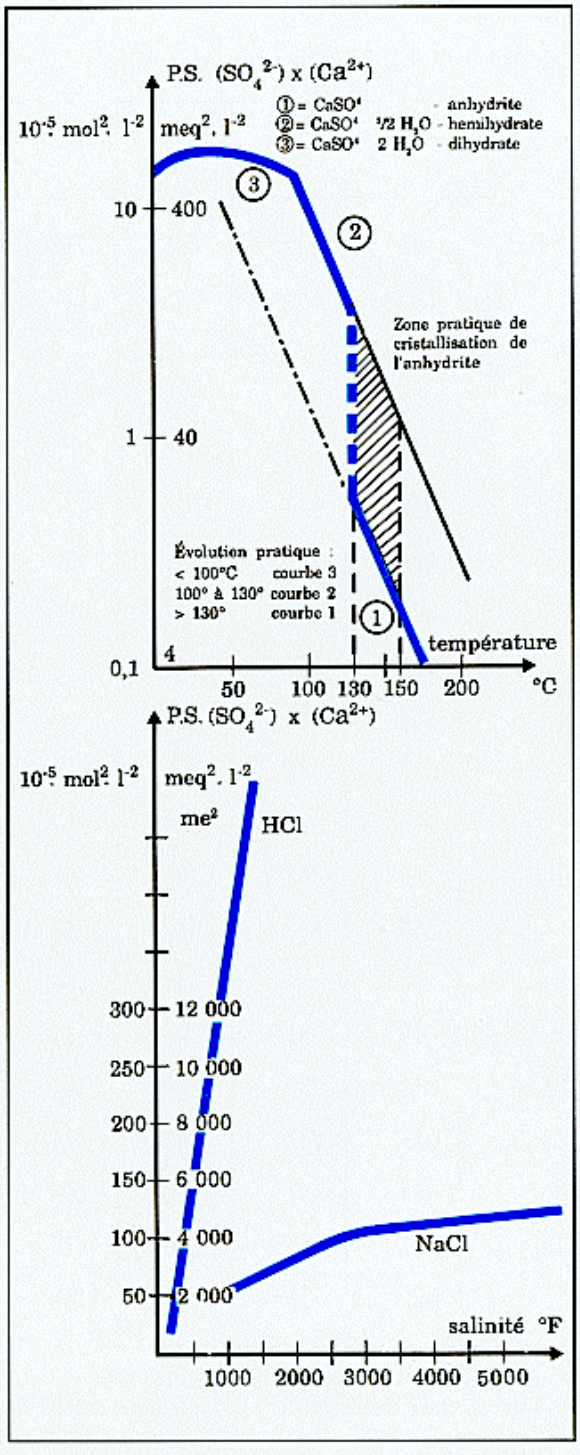


Figure 227 a. Produit de solubilité PS du sulfate de calcium dans l'eau pure en fonction de la température.

Figure 227 b. Produit de solubilité PS du sulfate de calcium en fonction de la salinité et à 25 °C.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Solubilité de la silice**

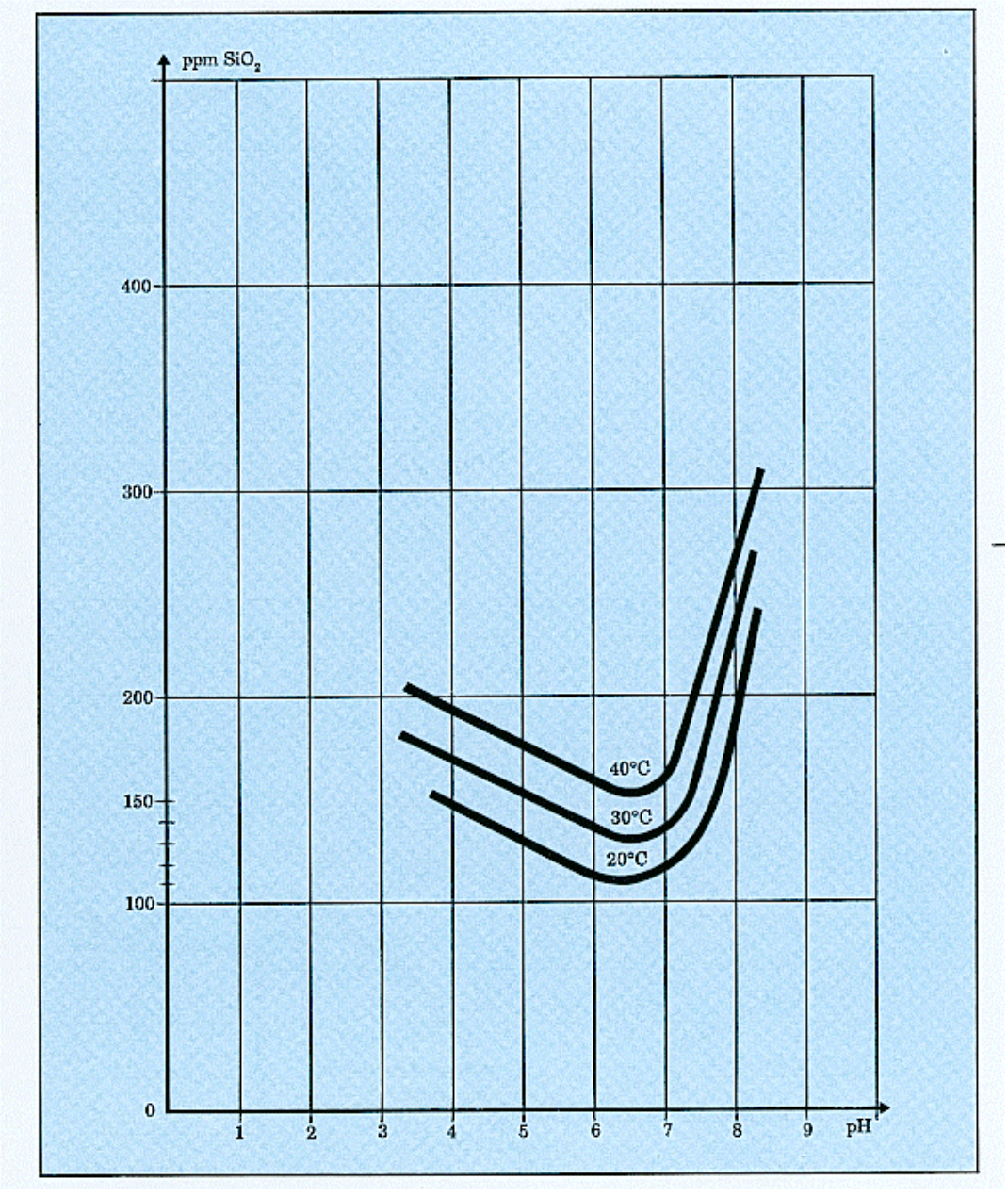


Figure 228. Solubilité de la silice en fonction du pH et de la température.

Nota: en l'absence d'inhibiteurs de polymérisation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.4.2. Solution de soude

pH des solutions pures de NaOH

pH	NaOH mg.l^{-1}	pH	NaOH mg.l^{-1}
7,5	0,013	9,5	1,3
8	0,04	10	4
8,5	0,13	10,5	13
9	0,4	11	40

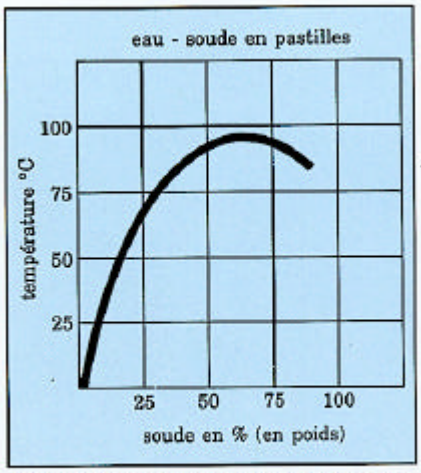


Figure 229. Température maximale atteinte lors de la dissolution de pastilles.

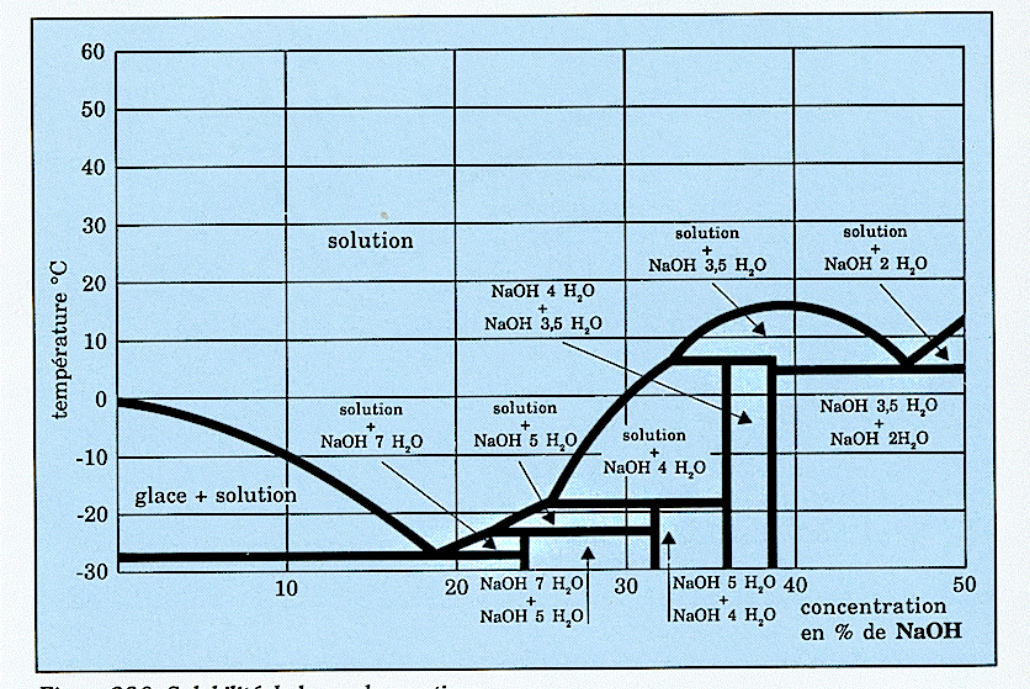


Figure 230. Solubilité de la soude caustique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.4.3. Solutions d'acide sulfurique

Concentration H_2SO_4		**Masse volumique kg.l^{-1}**	**Point de fusion**	**Chaleur massique kJ. kg^{-1}**
%	g.l^{-1}	15 °C	°C	18 °C
5	51,6	1,033	- 2	3,992
10	106	1,068	- 5	3,857
15	165	1,104	- 8	3,666
20	228	1,142	- 14	3,532
25	295	1,182	- 22	3,361
30	365	1,222	- 36	3,200
40	522	1,306	- 68	2,830
50	699	1,399	- 37	2,533
70	1130	1,615	- 41	1,985
90	1640	1,820	- 6	1,659
91	1660	1,825	- 11	1,597
92	1680	1,829	- 24	1,584
93	1700	1,833	- 38	1,513
94	1725	1,836	- 28	1,496
95	1725	1,839	- 19	1,484
96	1770	1,8406	- 11	1,450
97	1786	1,8414	- 5	1,434
98	1804	1,8411	+ 0	1,404
99	1821	1,8393	+ 6	1,409
100	1836	1,8357	+ 10,4	1,400

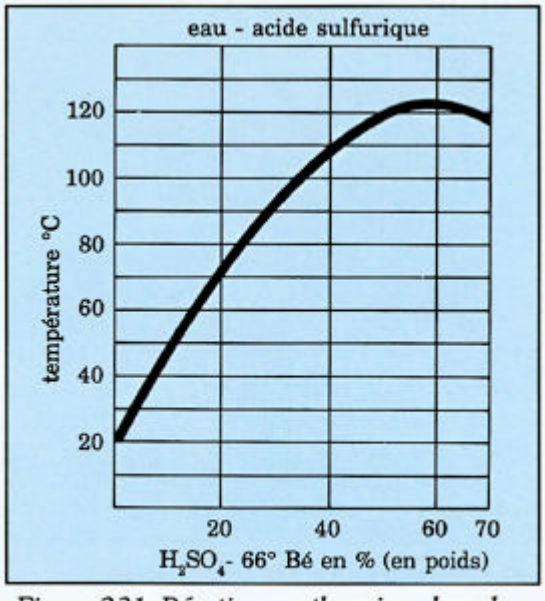


Figure 231. Réaction exothermique lors du mélange eau-acide sulfurique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

.

3.2.4.4. Solutions d'ammoniaque et de morpholine

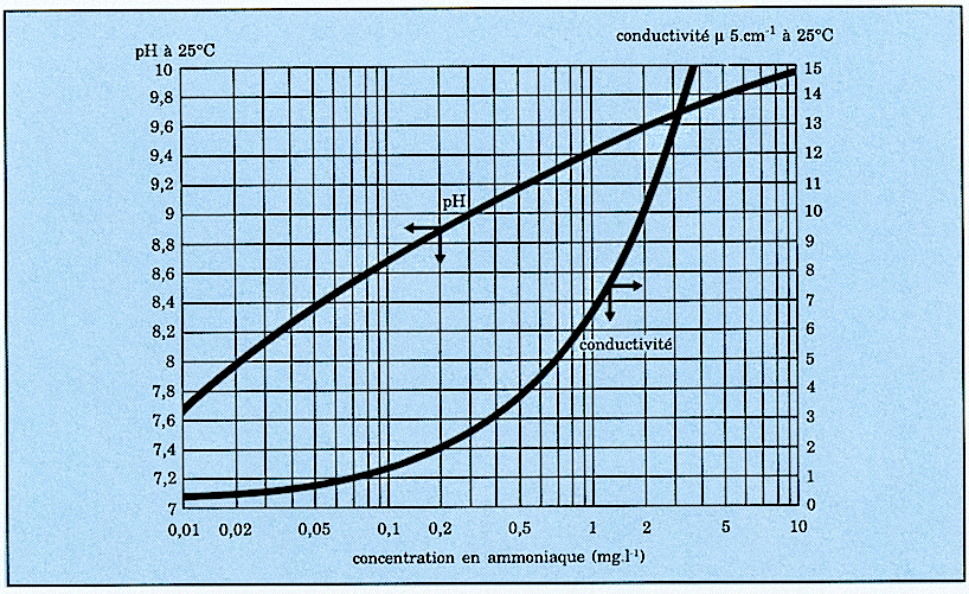


Figure 232. pH et conductivité à 25° de solution d'ammoniaque (d'après G.D.L.-E.D.F.).

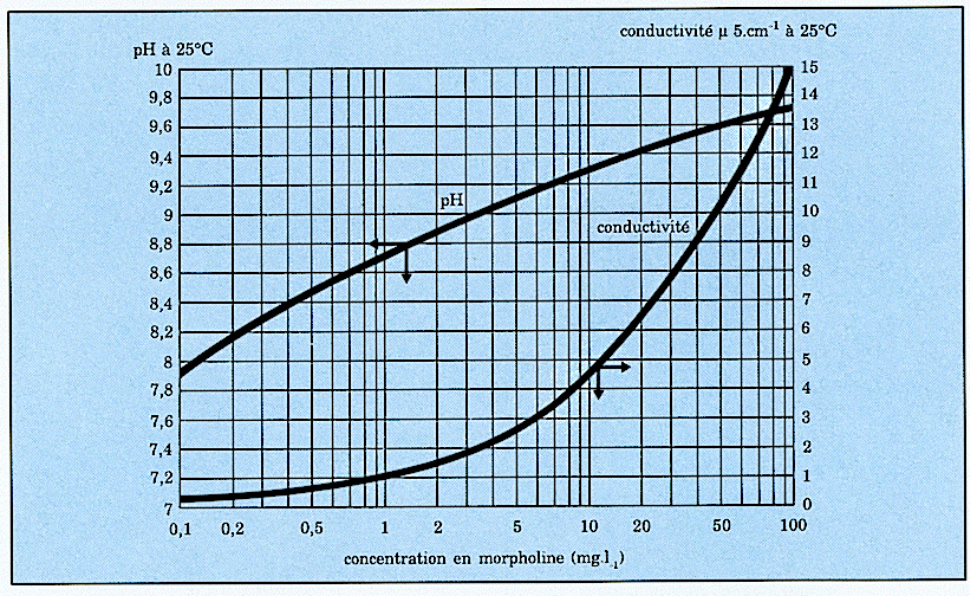


Figure 233. pH et conductivité à 25° de solutions de morpholine (d'après G.D.L.-E.D.F.).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.4.5. Solution de chlorure ferrique

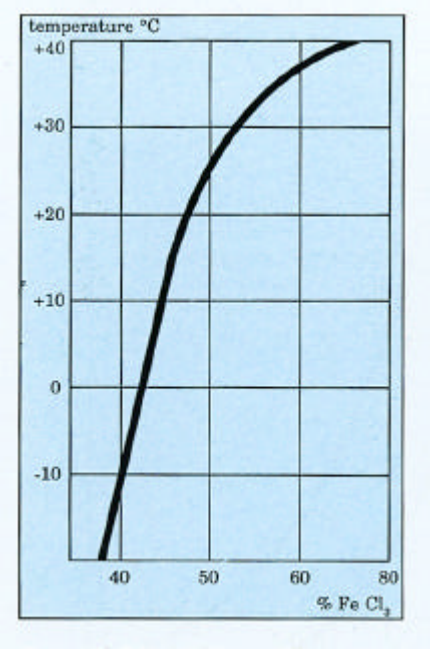


Figure 234. Solubilité du $FeCl_3$ à différentes températures

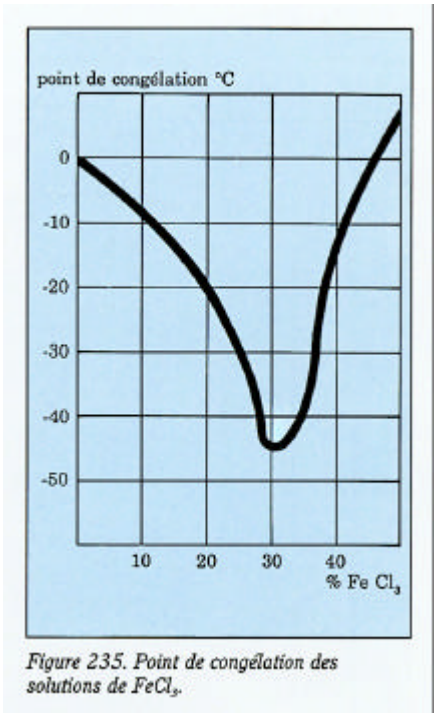


Figure 235. Point de congélation des solutions de $FeCl_3$.

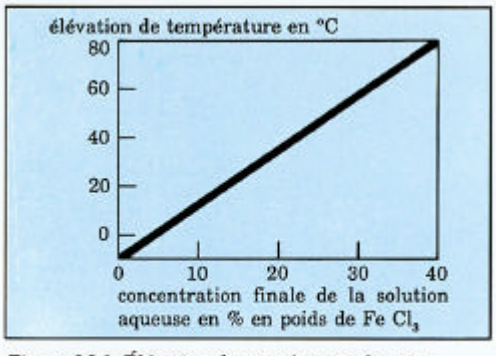


Figure 236. Élévation de température obtenue lors de la dissolution de chlorure ferrique dans l'eau.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.4.6. Chaux vive

La figure 237 donne:

- l'élévation de température,
- les concentrations respectives en $g.l^{-1}$ CaO ou $Ca(OH)_2$,
- les densités, en fonction de la dilution g. d'eau par gramme de CaO lors de l'extinction de la chaux vive.

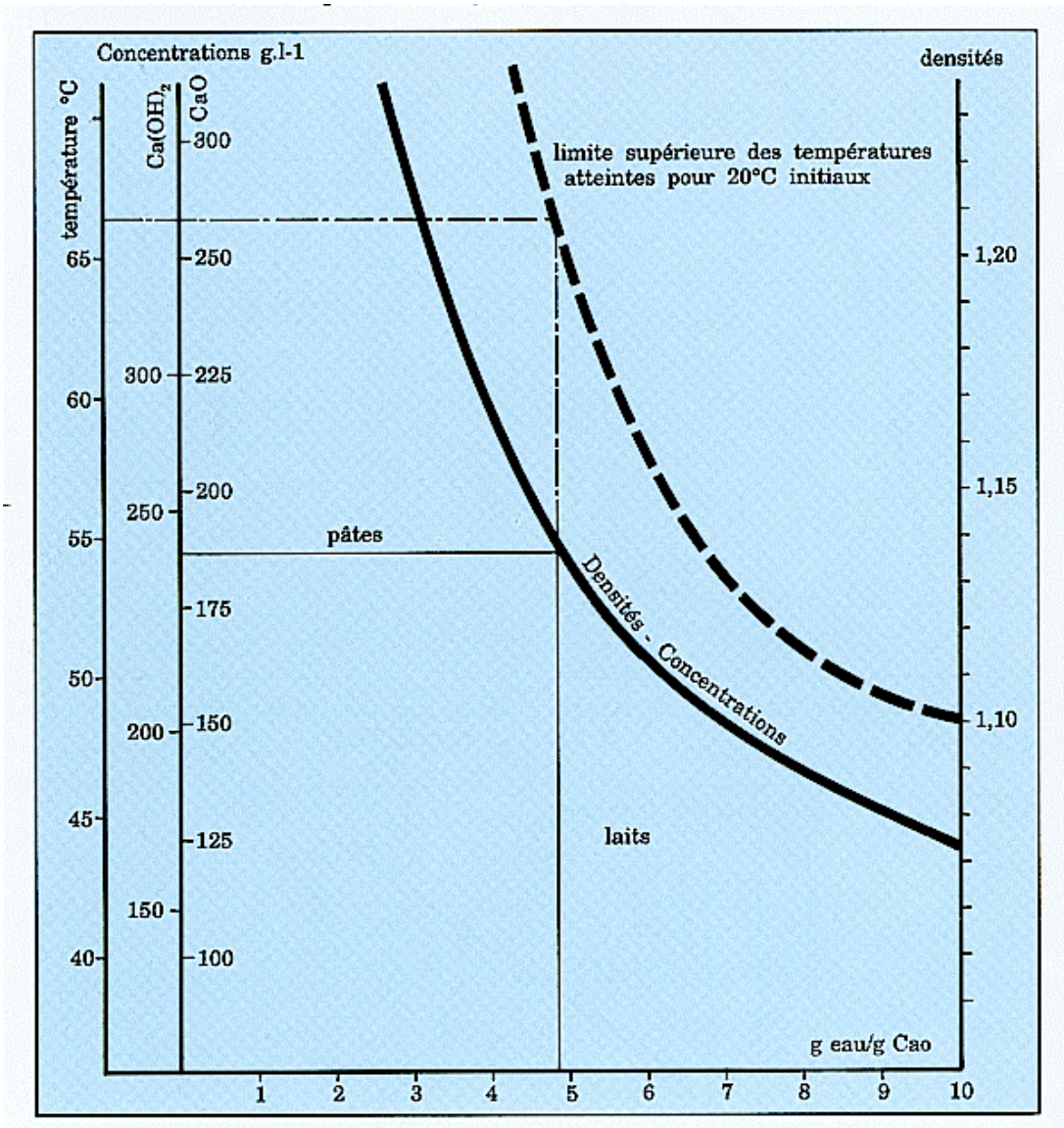


Figure 237. Extinction de la chaux vive.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.5. Tableau des pK

CONSTANTE DES **COUPLES ACIDES/BASES USUELS DANS** L'EAU A 25 °C

Nom de l'acide	**Formule de l'acide**	**Formule de la base**	**pK**
Acide sulfurique	H_2SO_4	HSO_4^-/SO_4^{2-}	1,9
Acide chromique	H_2CrO_4	$HCrO_4/CrO_4^{2-}$	0,7/6,4
Acide oxalique	$H_2C_2O_4$	$HC_2O_4^-/C_2O_4$	1,2/4,1
Acide phosphoreux	H_3PO_3	$H_2PO_3^-/HPO_3^{2-}/PO_3^{2-}$	1,6/6,4
Acide sulfureux	H_2SO_3	HSO_3^-/SO_3^{2-}	1,8/7,1
E.D.T.A.			2,0/2,7/6,2/10,3
Acide orthophosphorique	H_3PO_4	$H_2PO_4/HPO_4^{2-}/PO_4^{3-}$	2,2/7,2/12,0
Acide fluorhydrique	HF	F^-	3,2
Acide nitreux	HNO2	NO_2^-	3,4
Acide formique	HCOOH	$HCOO^-$	3,7
Acide cyanique	HCNO	CNO^-	3,8
Acide acétique	CH_3CO_2H	$CH_3CO_2^-$	4,8
Ion aluminium	$Al^{3+}aq$	$Al\ OH^{2+}aq$	4,9
Acide carbonique	H_2CO_3	HCO_3^-/CO_3^{2-}	6,4,10,2
Acide sulfhydrique	H_2S	HS^-/S^{2-}	7,1/14
Acide hypochloreux	HC1O	$C1O^-$	7,3
Acide hypobromeux	HbrO	BrO^-	8,7
Acide borique	H_3BO_3	$H_2BO_3/HBO_3^{2-}/BO_3^{3-}$	9/12,7/13,8
Acide cyanhydrique	HCN	CN^-	9,1
Ion ammonium	NH_4	NH_3 ou NH_4OH	9,2
Acide hypo-iodeux	HIO	IO^-	10,7
Ion calcium	Ca^{2+}	$CaOH^+/Ca(OH)_2$	11,6/12,6

NOTA: Les acides forts et les bases fortes sont considérés totalement dissociés.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.6. Équivalences DCO - DB05 - DOTh de quelques composés organiques en g par g de composé

(DOTh = demande totale théorique en oxygène)

Appellations		DCO	DB05	DOTh
Acides organiques				
- formique	ac. méthanoïque	0,30	0,24	0,34
- acétique	ac. éthanoïque	1	0,65	1,06
- propionique	ac. propanoïque	1,4	1,1	1,51
- stéarique	1 - octadécanoïque	1,6	1,4 - 0,5	2,13
- lactique	2 - hydroxypropanoïque	0,9	0,6	1,06
- citrique		0,6	0,4	0,68
- oxalique	ac. éthanedioïque	0,18	0,15	0,18
- tartrique	ac. racémique	0,5	0,3	0,53
Alcools				
- méthylique	méthanol	1,4	1	1,5
- éthylique	éthanol	2	1,6	2,1
- n propylique	n propanol	2,2	1,5	2,4
- iso propylique	1 - propanol	2,2	1,2	2,4
- n butylique	1 - butanol	2,4	1,7	2,59
- glycérine	1, 2, 3 propanetriol	1,1	0,8	1,22
Alydéhydes et cétones				
- ald. formique	formaldéhyde	1,02	0,9 - 0,3	1,07
- ald. acétique	acétaldéhyde	1,8	1,3	1,82
- furfural	2 - furaldéhyde	1,6	0,8 - 0,3	1,66
- acétone	2 - propanone	1,9	0,8 - 0,5	2,2
- méthyléthycétone (MEC)	2 - butanone	2,3	1,8	2,44
Carbohydrates				
- amidon		0,9	0,4 - 0,8	1,18
- glucose		0,9	0,6 - 0,8	0,93

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Appellations		DCO	DBO_5	DOTh
Amines et amides				
- monoéthanolamine (MEA)	2 amino éthanol	1,3	0,95	2,4
- diéthanolamine (DEA)	bis (2 hydroxyéthyl) amine	1,5	0,9	2,13
- triéthanolamine (TEA)	tri (2 hydroxyéthyl) amine	1,5	0,5	2,04
- acrylonitrile	propenenitrile	1,4	0,7	3,17
- aniline	amino benzène	2,4	1,5	3,09
- mélamine	2, 4, 6 triamine s-triazine	-	0	3,04
- méthionine		-	0,4 - 1,4	2,07
- morpholine	diéthylénimide ox.	-	0 - 0,2	2,6
- urée	carbamide	0	0,1	1,06
- diméthylformamide		-	-	1,86
Hydrocarbures				
- n hexane		0,8	0,3 - 0	1,94
- n décape		1,6	1,2 - 0,1	2,12
- n hexadécane		2,2	0,6 - 0,1	2,23
- benzène		2,8	2,1 - 0,5	3,1
- styrène	vinyl benzène	2,9	1,5	3,07
- toluène	méthyl benzène	1,8	1,2 - 0,5	3,13
- o-xylène	1, 2 diméthylbenzène	2,6	1,6 - 1	3,12
Composés hétérocycliques				
- pyridine		0,0	0 - 1,2	3,03
- quinoléine	benzol pyridine	2,3	1,7	2,5
Composés particuliers				
- acroléine	propénal	1,7	0	2,0
- acrylamide	propénamide	1,3	0 - 1	2,35
- caprolactame	cyclohexanone i-oxime.	0,6	0,4	2,12
- épichlorhydrine		1,1	0	1,21
- oxyde d'éthylène	1, 2 époxyéthane	1,7	0,1	1,82
- oxyde de propylène	1, 2 époxypropane	1,8	0,2	2,21
- phénol	hydrobenzène	2,3	1,7	2,38
Composés du soufre				
- sulfures	S^{2-}			2
- sulfocyanures	SCN^-			2,2
- S colloïdal				1,5
- thiosulfates	$S_2O_3^{2-}$			0,6
- tétrathionates	$S_4O_6^{2-}$			0,5
- sulfites	SO_3^{2-}			0,2

Nota: pour certains composés, les valeurs de DBO peuvent être très dépendantes, soit des conditions d'ensemencement ou d'acclimatation (cétones, SCN^- etc.) soit, du niveau de concentration initiale dont l'élévation détériore la dégradabilité (hydrocarbures aromatiques notamment).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3. CONSTANTES CARACTÉRISTIQUES DES GAZ

3.3.1. Masse volumique des gaz

Si M° est la masse du litre à 0 °C, la masse du litre à t °C à la même pression est:

$$M_t = \frac{M_o}{1 + 0{,}00366\,t}$$

Si M'_o est la masse du litre sous 760 mm de mercure, la masse du litre à la pression réelle P est:

$$M_p = \frac{P}{760} M'_o$$

3.3.2. Solubilité des principaux gaz dans l'eau

Normaux litres de gaz par litre d'eau sous une pression partielle de ce gaz égale à 1 bar.

La formule ci-après permet de retrouver la teneur en gaz dissous dans un liquide à partir de la constante de Henry (figure 238)

$$Py_i = Hx_i$$

P = pression totale du gaz.

H = constante de Henry dans la même unité que P.

x_i = fraction molaire du gaz dans le liquide.

y_i = fraction molaire du gaz dans le mélange gazeux.

Gaz	Densité par rapport à l'air	Masse du litre à 0 °C et à 760 mm de mercure en g
Air	1	1,29349
Oxygène O_2	1,1052	1,4295
Azote N_2	0,967	1,2508
Hydrogène H_2	0,06948	0,08987
Dioxyde de carbone CO_2	1,5287	1,978
Chlore $C1_2$	2,491	3,222
Ammoniac NH_3	0,5971	0,772
Dioxyde de soufre SO_2	2,263	2,927
Sulfure d'hydrogène H_2S	1,1895	1,539

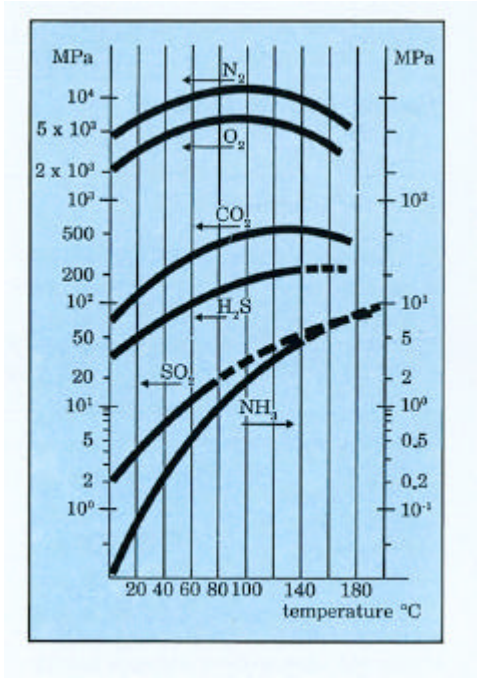


Figure 238. Constante de Henry pour différents gaz.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Température	**Gaz**							
	Air	O_2	N_2	CO_2	H_2S	$C1_2$	NH_3	SO_2
0	0,0288	0,0489	0,0235	1,713	4,621	4,61	1135	75,00
5	0,0255	0,0429	0,0208	1,424	3,935	3,75	1005	62,97
10	0,0227	0,038	0,0186	1,194	3,362	3,095	881	52,52
15	0,0205	0,0342	0,0168	1,019	2,913	2,635	778	43,45
20	0,0187	0,0310	0,0154	0,878	2,554	2,260	681	36,31
25	0,0172	0,0283	0,0143	0,759	2,257	1,985	595	30,50
30	0,0161	0,0261	0,0134	0,665	2,014	1,769	521	25,87
35	0,0151	0,0244	0,0125	0,592	1,811	1,570	460	22,00
40	0,0143	0,0231	0,0118	0,533	1,642	1,414	395	18,91
50	0,0131	0,0209	0,0109	0,437	1,376	1,204	294	15,02
60	0,0123	0,0195	0,0102	0,365	1,176	1,006	198	11,09
70	0,0118	0,0183	0,0097	0,319	1,010	0,848		8,91
80	0,0116	0,0176	0,0096	0,275	0,906	0,672		7,27
90	0,0115	0,0170	0,0095	0,246	0,835	0,380		6,16
100	0,0115	0,0169	0,0095	0,220	0,800			
110		0,0172		0,204				
120		0,0176		0,194				
130		0,0183						
140		0,0192						

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

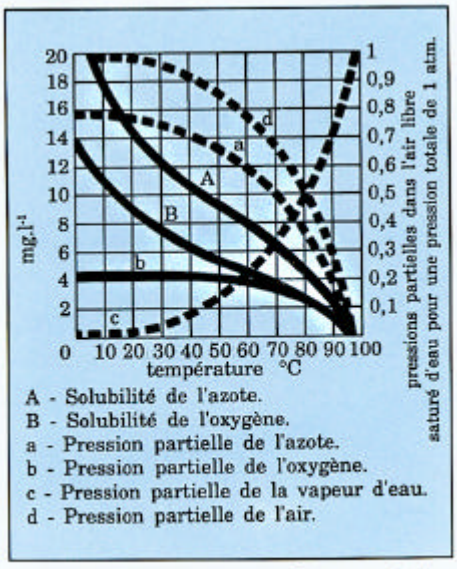


Figure 239. Solubilité en mg.l^{-1} des gaz de l'air dans l'eau sous la pression atmosphérique.

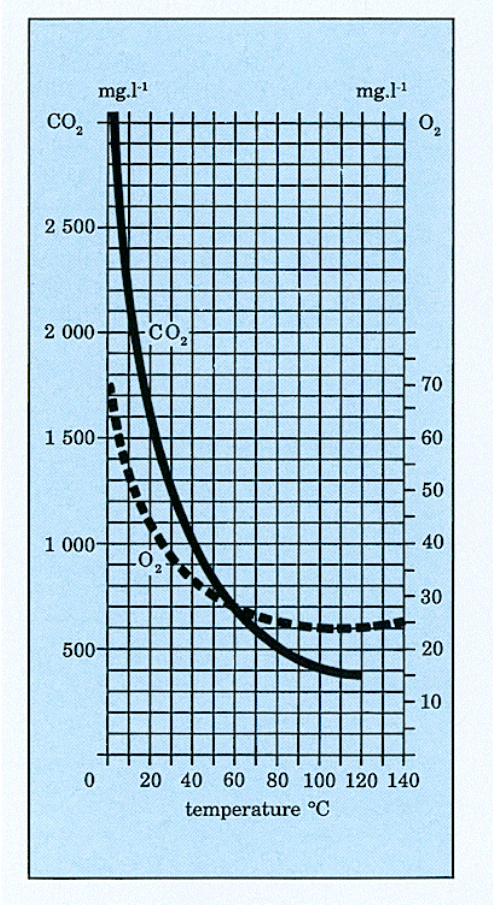


Figure 240. Solubilité de CO_2 et O_2 dans l'eau en mg.l^{-1} de gaz par litre d'eau à la pression atmosphérique et sous atmosphère de gaz pur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3.3. Viscosité cinématique de gaz usuels

Cas particuliers des gaz usuels

La viscosité cinématique v fonction de la température, à la pression normale de 760 mm de mercure, â pour valeur en $m^2.s^{-1}$:

Cette viscosité doit être corrigée en fonction de la pression d'après la relation suivante (non valable pour la vapeur d'eau)

$$\nu' = \nu \frac{P}{P'}$$

avec:

v' = viscosité cinématique corrigée, en $m^2.s^{-1}$,

P' = pression absolue réelle,

P = pression absolue normale, exprimée avec la même unité que P'.

La masse volumique p' du fluide, en $kg.m^{-3}$ dans les conditions de température t' (°C) et de pression absolue P' de l'écoulement, se déduit de la masse volumique ? dans les conditions normales d'après la formule

$$\rho' = \rho \times \frac{P'}{P} \times \frac{273}{273 + t'}$$

t °C	0	20	40	60	80	100
Air	$13{,}20.10^{-6}$	$15{,}00.10^{-6}$	$16{,}98.10^{-6}$	$18{,}85.10^{-6}$	$20{,}89.10^{-6}$	$23{,}00.10^{-6}$
Vapeur d'eau	11,12	12,90	14,84	16,90	18,66	21,50
$C1_2$	3,80	4,36	5,02	5,66	6,36	7,15
CH_4	14,20	16,50	18,44	20,07	22,90	25,40
CO_2	7,00	8,02	9,05	10,30	12,10	12,80
NH_3	12,00	14,00	16,00	18,10	20,35	22,70
O_2	13,40	15,36	17,13	19,05	21,16	23,40
SO_2	4,00	4,60				7,60

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3.4. Humidité absolue de l'air atmosphérique à la saturation en fonction du point de rosée

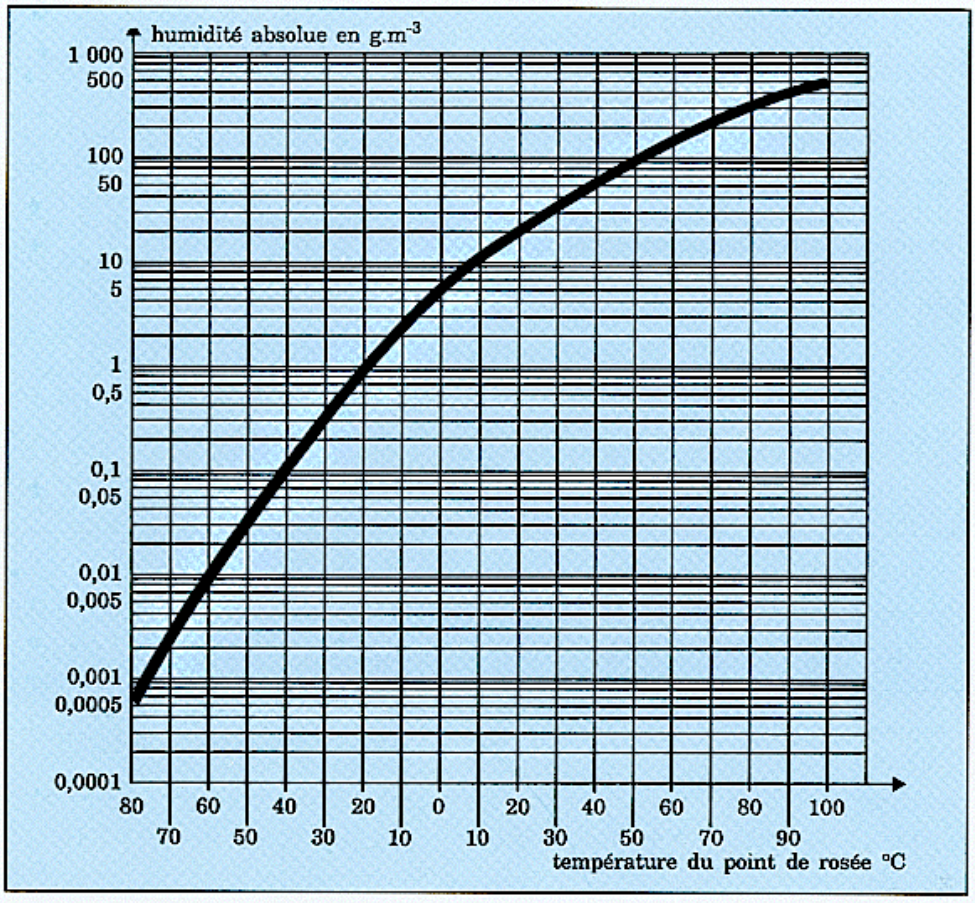


Figure 241. Humidité absolue de l'air atmosphérique.

3.3.5. Chlore

3.3.5.1. Caractéristiques générales

Le chlore est un gaz jaune verdâtre à l'état normal, dont les constantes physiques sont les suivantes

- densité par rapport à l'air	2,491
- masse atomique Cl =	35,46
- point de liquéfaction sous 100 kPa	- 34,1 °C
- point de congélation	- 102 °C
- température critique	144 °C
- pression critique	7 710 kPa
- chaleur massique du gaz	0,518 kj.kg^{-1} (0,124kcal.kg^{-1})
- chaleur massique du liquide	0,92 kJ.kg^{-1} (0,22 kcal.kg^{-1})

A 15 °C et sous 760 mm de Hg, l kg de chlore donne naissance à 314 litres de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

chlore à l'état gazeux et 1 litre de chlore liquide correspond à 456 litres de gaz. Il se liquéfie par refroidissement et par compression sous une pression variable avec la température 1000 kPa à 40 °C; 500 kPa à 18 °C

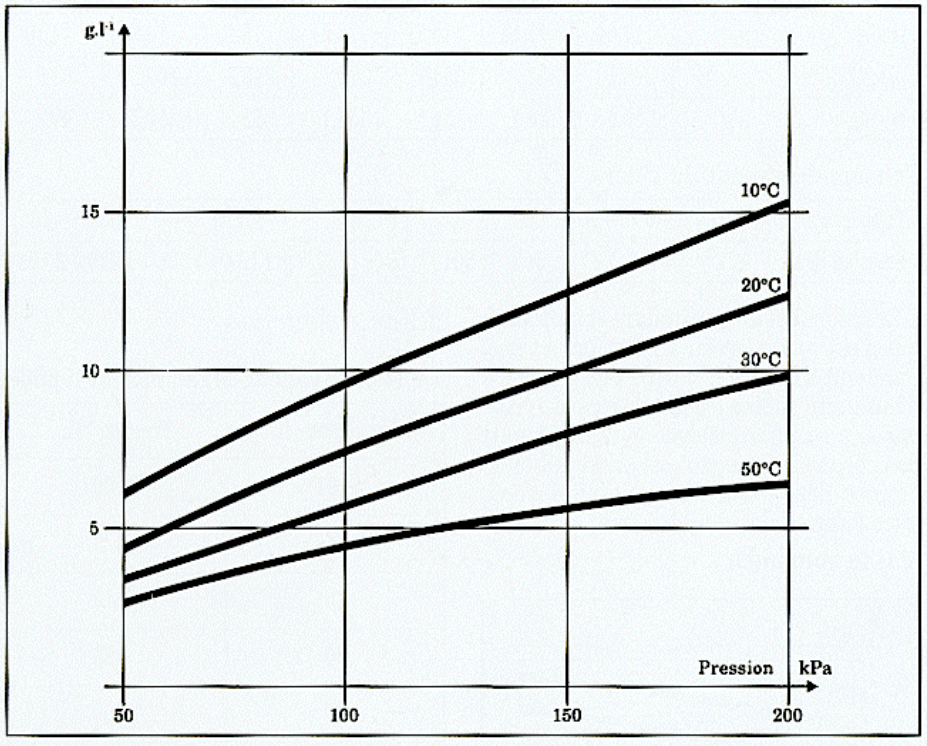


Figure 242. Solubilité du chlore dans l'eau.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3.5.2. Influence de la température et de la pression

Chaleur latente de vaporisation

Température °C	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
J.mole^{-1}	17,64	17,14	16,59	16,01	15,47	14,88	14,30
kJ.kg^{-1}	249,1	242	234,1	226,1	218,2	209,8	201,5
kcal.kg^{-1}	56,6	58,9	56,1	54,1	52,2	50,2	49,2

Tension de vapeur du chlore

Température °C	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70
Pression kPa	**121**	**181**	**261**	**367**	**501**	**670**	**877**	**1127**	**1426**	**1779**	**2193**

Le chlore est un gaz irritant et suffocant qui n'est pas corrosif à l'état pur et sec. Par contre, il est très corrosif en présence d'humidité, même légère. Il se caractérise par une réactivité élevée avec la plupart des corps simples et il est susceptible de donner lieu à des réactions explosives avec l'ammoniac, l'hydrogène, etc.

Masse volumique

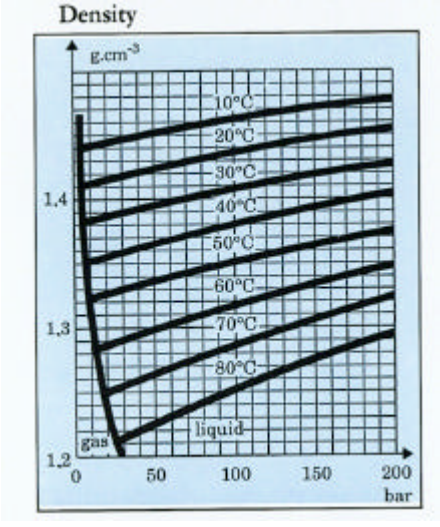


Figure 243. Variation de la masse volumique du chlore

3.3.6. Ammoniac

Tension de vapeur de l'ammoniac liquide

Température °C	**Pression kPa**
- 31	100
0	420
10	610
20	850
30	1160
40	1570
50	1960

La législation exige des réservoirs timbrés à 2 000 kPa et essayés à 3 000 kPa.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3.7. Ozone

3.3.7.1. Solubilité de l'ozone dans l'eau

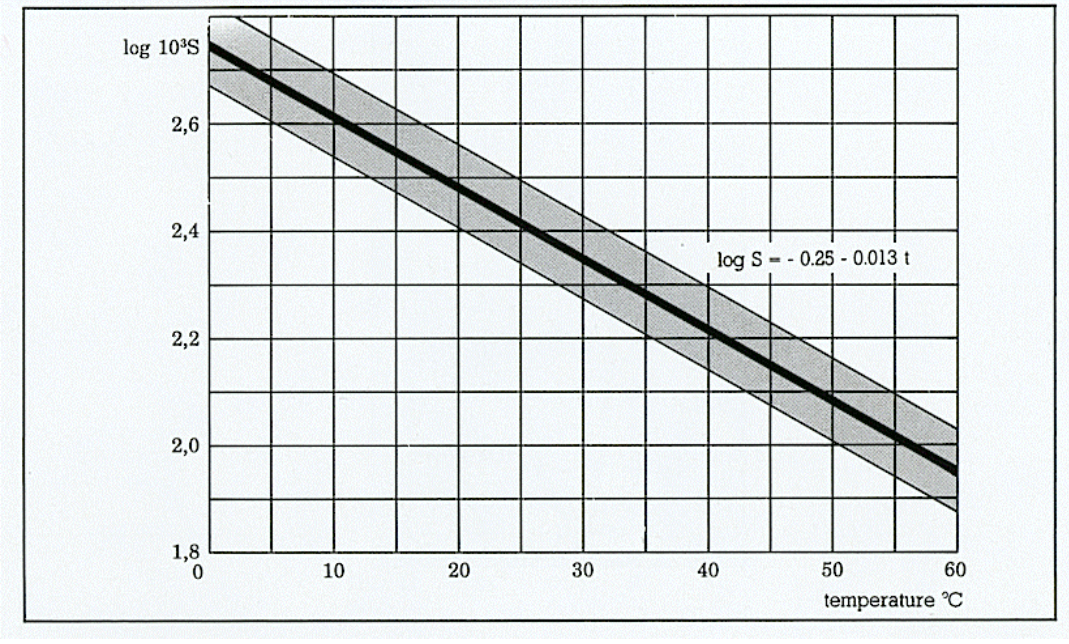


Figure 244. Solubilité de l'ozone dans l'eau. S = mg par litre dans 1'eau / mg par litre dans gaz porteur.

3.3.7.2. Évolution de l'ozone résiduel en fonction du pH et de la température de l'eau

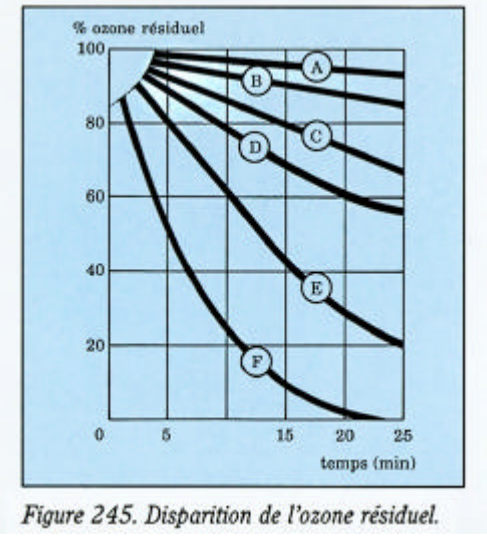


Figure 245. Disparition de l'ozone résiduel.

	Température °C	pH
A	1	7,6
B	10	7,6
C	15	7,6
D	20	7,6
E	15	8,5
F	15	9,2

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.4. LIMITES DE PRÉCIPITATION DES MÉTAUX SOUS FORME HYDROXYDE

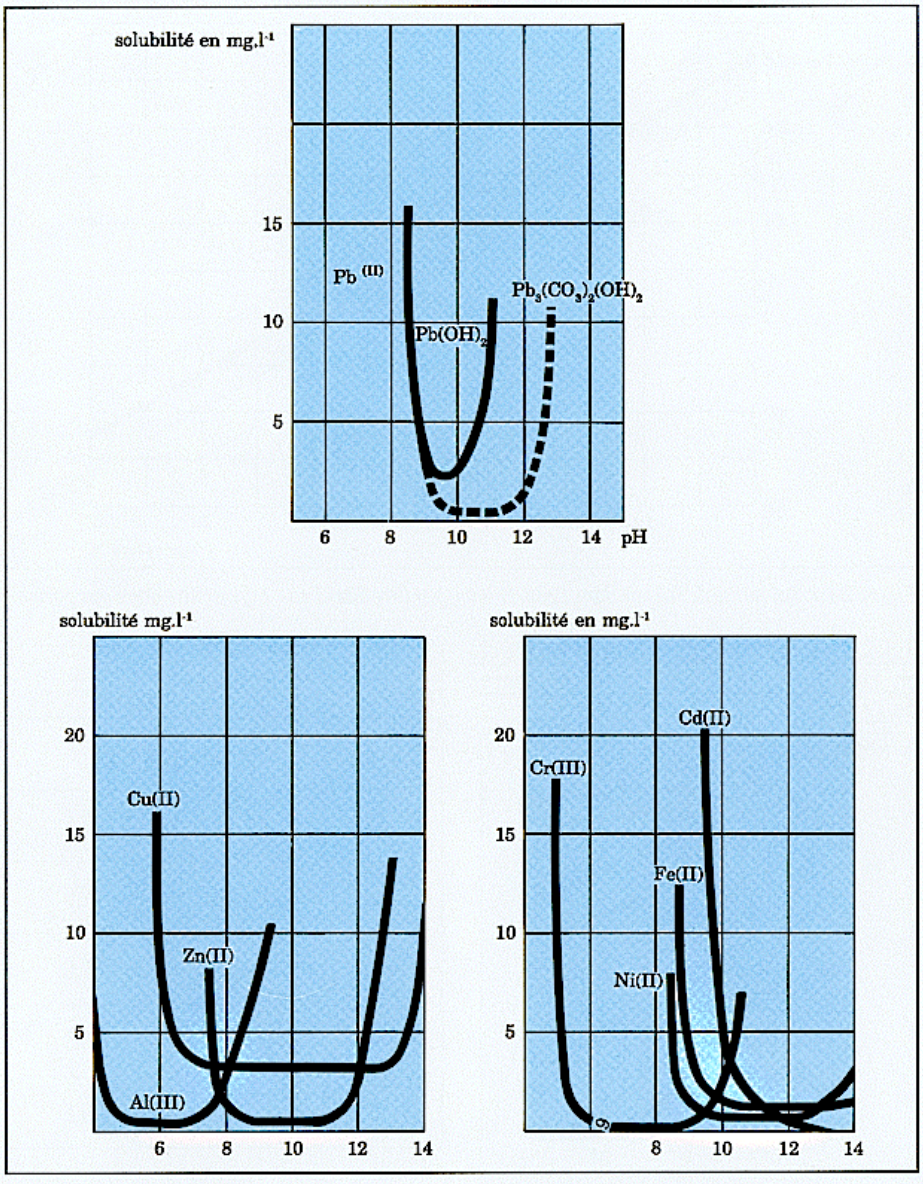


Figure 246. Solubilité des métaux en fonction du pH.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.5. PRINCIPAUX RÉACTIFS UTILISÉS EN TRAITEMENT D'EAU

3.5.1. Clarification

Désignation	Masse molaire	Emploi	Formes disponibles	Caractéristiques	densité	Solubilité à 20 °C	Point de cristallisation °C	Observations
Sulfate d'alumium $Al_2(SO_4)_3 18H_2O$	666	Coagulation	Noisette Grain de riz Poudre	17 à 18% Al_2O_3	1	660 $g.l^{-1}$		Produit acide, mais peu dangereux
			Liquide	7,5 à 8% Al_2O_3 (630 à 650 $g.l^{-1}$ en $Al_2(SO_4)_3 18H_2O$)	1,45		+ 3	
Hydroxy chloro sulfate d'aluminium $Cl_{(m)}\ SO_{4(n)}\ Al(OH)_{3-(m+2n)}$		Coagulation	Liquide	Al_2O_3 10% en poids				Produit acide. Nombreux produits disponibles sur le marché
Sulfate ferreux $FeSO_4, 7H_2O$	278	Coagulation	Poudre verte	20% de Fe	0,9	390 $g.l^{-1}$		Produit acide, peu dangereux
Sulfate ferrique $Fe_2(SO_4)_3\ 9H_2O$	562	Coagulation	Poudre blanche	25 à 26% de Fe	1,0	Très soluble		Produit acide corrosif
Chlorure ferrique								
• $FeCl_3 6H_2O$ solide	270	Coagulation	Cristallisé Sublimé	60% $FeCl_3$ 99% $FeCl_3$		1026 $g.l^{-1}$		Produit acide corrosif Fond à + 34 °C
• $FeCl_3$ (35%) en solution	162	Coagulation	Liquide	41% $FeCl_3$ (600 $g.l^{-1}$)	1,45	–	– 10	
Chloro-sulfate de fer ($FeClSO_4$)	187	Coagulation	Solution brun-rouge	14% de Fe (200 $g.l^{-1}$)	1,5	–	– 8	Produit acide (Cristallisation solution à 160 $g.l^{-1}$: – 30 °C). Nom commercial : CLAIRTAN
Silicate de sodium $n\ SiO_2, Na_2O$	122	Floculation (préparation de la silice activée)	Liquide	24-26% SiO_2 26-28% SiO_2 27-28% SiO_2	1,35 1,38 1,4		0	Solutions visqueuses
Aluminate de sodium $nNa_2O, Al_2O_3H_2O$	–	Floculation Désiliciage	Cristallisé	20 à 40% Al_2O_3 35% Na_2O	1	1000 $g.l^{-1}$		
			Liquide	21% Al_2O_3 (310 $g.l^{-1}$) 18% Na_2O 60% H_2O	1,48	–	– 20	

* Les densités des solides sont des densités apparentes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.5.2 Acides

Désignation	Masse molaire	Emploi	Formes disponibles	Caractéristiques	densité	Solubilité à 20 °C	Point de cristallisation °C	Observations
Acide sulfurique H_2SO_4	98	Déminéral. Neutralis.	Liquide	92 % 96 % 98 %	1,83 1,84 1,84		− 24 − 11 0	Acide très dangereux Dégagement de chaleur important lors de la dilution
Acide chlorhydrique HCl	35,5	Déminéral. Neutralis.	Liquide	33 à 35 % HCl (380 à $410\ g.l^{-1}$)	1,18		− 30 à − 40	Acide fort très dangereux
Acide nitrique HNO_3	63	Déminéral. Neutralis.	Liquide incolore	56 à 58 % HNO_3 ($750\ g.l^{-1}$) 92,6 % HNO_3	1,35		−	Acide fort, très dangereux. Oxydant puissant pouvant réagir avec les matières organiques Acide nitrique fumant

3.5.3. Bases

Soude caustique NaOH	40	Déminéral. Neutralis.	Solide en paillettes Liquide	98 % NaOH 33 % ($450\ g.l^{-1}$) 49 % ($790\ g.l^{-1}$)	 1,36 1,51	52 % soit $800\ g.l^{-1}$	 + 7 + 10	Produit caustique très dangereux
Chaux blutée $Ca(OH)_2$	74	Floculation Décarbonat. Neutralis. Reminéralis.	Poudre caractérisée par le tamis	92 à 99 % $Ca(OH)_2$	0,4 à 0,5	$1,6\ g.l^{-1}$		Tamis le plus utilisé Tamis 120, particules de 50 à 60 microns
Chaux vive CaO	56	Floculation Décarbonat. Neutralis.	Poudre ou grains	90 à 95 % CaO	0,8 à 1,2	$1,3\ g.l^{-1}$		Produit caustique dangereux très hygroscopique Réaction exothermique lors de la dilution
Ammoniaque	35	Déminéral. Condition-nement	Liquide	28 % NH_3 64 % NH_4OH 20 % NH_3	0,92 0,95		−	Produit basique

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.5.4. Désinfection

Désignation	Masse molaire	Emploi	Formes disponibles	Caractéristiques	densité	Solubilité à 20 °C	Point de cristallisation °C	Observations
Chlorite de sodium $NaClO_2$	90,5	Désinfection pour préparation du dioxyde de chlore	Cristallisé en aiguilles	80 % $NaClO_2$	0,65	390 $g.l^{-1}$	–	Produit irritant Éviter les contacts avec les matières réductrices et organiques (bois, papier, tissu, ...) Risque d'explosion
			Solution	25 % $NaClO_2$	1,21		– 8 à – 10	
Hypochlorite de sodium NaClO (Eau de Javel)	74,5	Désinfection	Liquide jaune verdâtre	47 à 50° chlorométriques correspondant à 150 $g.l^{-1}$ de Cl_2 actif	1,21		– 15	Produit oxydant basique Solution instable
Hypochlorite de calcium $Ca(ClO)_2$ 2 H_2O	179	Désinfection	Poudre	92 à 94 % 600 $g.kg^{-1}$ de Cl_2 actif	1	Très soluble (Voir obs.)	–	Produit oxydant. En raison des impuretés qu'il contient, ne pas dépasser une concentration de 60 $g.l^{-1}$
Permanganate de potassium $KMnO_4$	158	Désinfection Oxydation	Poudre en paillettes de couleur violette		0,8 à 1,2	30 $g.l^{-1}$	–	Produit oxydant
Peroxyde d'hydrogène H_2O_2	34	Désinfection Oxydation	Liquide incolore	35 % H_2O_2 50 % H_2O_2 70 % H_2O_2	1,13 1,19 1,29		– 33 – 43 – 38	Produit irritant non toxique. A conserver à l'écart des matériaux combustibles

3.5.5. Réactifs de décarbonatation

Carbonate de sodium Na_2CO_3, 10 H_2O	286	Floculation Neutralis Décarbonat	Solide Poudre blanche	99 % Na_2CO_3	2,53	395 $g.l^{-1}$	-	Basique, mais peu dangereux
		.	Cristallisé	19 % MgO		1,67 $g.l^{-1}$		
Chlorure de Magnésium $MgCl_26H_20$	203	Décarbonat.					-	
Magnésie MgO	40	Décarbonat(désiliciage)	Poudre	98 % MgO		Très peu soluble(6 $mg.l^{-1}$)		Utiliser la magnésie obtenue par précipitation

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.5.6. Conditionnement eaux de chaudières

Désignation	Masse molaire	Emploi	Formes disponibles	Caractéristiques	d*	Solubilité à 20 °C	Point de cristallisation °C	Observations
Phosphate disodique $Na2HPO4, 12 H20$	358	Conditionnement	Cristallisé	20 % P_2O_5	1,52	41 $g.l^{-1}$		Produit basique peu dangereux, solubilité à 80 °C: 874 $g.l^{-1}$
Phosphate trisodique $Na_3PO_4, 12 H_20$	380	Condition-nement	Cristallisé	20% P2O5	1,62	15 $g.l^{-1}$		Solubilité à 80°C:157 $g.l^{-1}$

3.5.7. Polyelectrolytes

Coagulant type KEMAZUR 4516	10^4	Clarificat. Filtration Flottation	Liquide (solution)	Polyamine pH = 2,5 moyennement cationique	1,06	Miscible à l'eau en toutes proportions	− 2	Produit instable lorsqu'il est dilué fortement (− de 5 %) Ne nécessite pas de préparation préalable
Coagulant type KEMAZUR 4553	5×10^4	Clarificat. Filtration Flottation	Liquide (solution)	Polyamine pH = 5,5 fortement cationique	1,16	Miscible à l'eau en toutes proportions	− 18	id°.
Floculant cationique type CS 245	$1{,}1 \times 10^7$	Déshydratation boue organique	Poudre	Co-polymère d'acrylamide densité apparente 0,85	1 en sol.	5 $g.l^{-1}$	0	Viscosité 750 centip. à 5 $g.l^{-1}$
Floculant anionique type AS25 ou ASP25	10^7	Clarificat.	Poudre	Co-polymère d'acrylamide densité apparente 0,8	1 en sol.	5 $g.l^{-1}$	0	Viscosité 120 centip. à 5 $g.l^{-1}$
Floculant cationique type PE23	6×10^6	Clarificat. Flottation	Liquide (émulsion)	Co-polymère d'acrylamide en émulsion dans un solvant	1,02	10 $g.l^{-1}$	− 10	Nécessite une préparation semblable à celle des poudres
Floculant anionique type PE14	$1{,}5 \times 10^7$	Clarificat. Flottation	Liquide (émulsion)	Co-polymère d'acrylamide en émulsion dans un solvant	1,02	15 $g.l^{-1}$	− 10	id°.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.5.8. Oxydants

Désignation	Masse molaire	Emploi	Formes disponibles	Caractéristiques	densité	Solubilité à 20 'C	Point de cristallisation C	Observations
Acide persulfurique H_2SO_5	114	Oxydant Décyanuration	Liquide	200 $g.l^{-1}$ H_2SO_5	1,3		- 25	Produit acide, dangereux (oxygène actif 2,1%) Nom commercial: acide de CARO
Hypochlorite de sodium	voir 3.5.4.							
Hypochlorite de calcium	voir 3.5.4.							
Permanganate de potassium	voir 3.5.4.							
Peroxyde d'hydrogène	voir 3.5.4.							

3.5.9. Réducteurs

Bisulfite de sodium $NaHSO_3$	84	Désoxygénation Déchloration	Liquide	23 à 2596 SO_2 (300 $g.l^{-1}$	1,32		+ 3	Produit corrosif
Hyposulfite de Sodium $Na_2S_2O_3$	118	id[0]	Poudre		1,2	700 $g.l^{-1}$	-	Produit alcalin réducteur
Sulfite de sodium Na_2SO_3, $7H_20$	252	id[0].	Cristallisé	48% SO_2		Voir obser	-	Produit neutre Solubilité à: 0 °C 328 $g.l^{-1}$ 40 °C 1960 $g.l^{-1}$
Sulfite de sodium anhydre Na_2SO_3	126	id[0]	Cristallisé	60 à 62 ¨% SO_2		Voir obser.	-	Solubilité à 0 °C 125 $g1^{-1}$: 40 °C 283 $g.l^{-1}$

3.5.10. Divers

Acide Phosphorique H_3PO_4	98	Nutriment	Liquide	45 % H_3PO_4 61 % H_3PO_4	1,75 1,72		-	Produit acide dangereux
Sulfate d'ammonium $(NH_4)_2SO_4$	132	Nutriment	Poudre verdàtre	20 à 21 % de N 23 à 24 % de S	1,77	Voir obser.		Solubilité 0 °C 706 $g.l^{-1}$ 100 °C 1040 $g.l^{-1}$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Désignation	Masse molaire	Emploi	Formes disponibles	Caractéristiq ues	densité	Solubilit é à 20°C	Point de cristallisati on °C	Observations
Phoshate diammonique $(NH_4)HPO_4$	132	Nutriment	Solide (poudre)	40% de N		Voir obser,		Solubilité: e à 10 °C 575 $g.l^{-1}$ à 70 °C 1060 $g.l^{-1}$
Carbonate de calcium $CaCO_3$	100	Minéralis Neutralis. Traitement des boues	Cristallisé		2,70	14 $mg.l^{-1}$		Produit inoffensif Utilisé en suspension
Bicarbonate de sodium $NaHCO_3$	84	Réajustement des titres	Poudre cristalline	99,7%	2,22	96 $mg.l^{-1}$		Produit inoffensif Densité apparente par tassement: 0,9 à 1,4
Chlorure de sodium NaCI(sel marin)	58,5	Adoucisseme nt (régénérat)	Cristallisé Granulés pastilles	97% NaCI	2,16	300 $g.l^{-1}$		Produit non dangereux
Fluorure de sodium Na F	42	Fluoration de l'eau	Poudre cristallisée blanche			43 $g.l^{-1}$		Produit dangereux corrosif
Acide citrique $C_6H_8O_7$	192	Lavage membranes osmose	Poudre cristalline blanche ou cristaux incolores		1,52	Très soluble		Produit acide peu dangereux

3.5.11. Gaz

Désignation	Masse molaire	Emploi	Aspect	Densité par rapport à l'air	Liquéfaction à la pression atmosphérique °C	Observations
Anhydride sulfureux SO_2	64	Déchroma tation Réduction	Gaz incolore	2,264	-10	Gaz très irritant
Ammoniac NH_3	17	Condition. Déminéral .	Gaz incolore	0,597	- 33	Gaz très irritant soluble dans l'eau, 33 % en poids à 20 °C
Chlore $C1_2$	70,9	Oxydation Désinfection	Gaz de couleur jaune verdâtre	2,49	- 34	Gaz très irritant solubilité dans l'eau: 7,3 $g.l^{-1}$ à 20 °C
Gaz carbonique CO_2	44	Minéralis.	Gaz incolore	1,96	- 78	Doit être de qualité alimentaire pour être utilisé en eau potable

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. HYDRAULIQUE

4.1. PERTES DE CHARGE PAR FROTTEMENT DANS LES TUYAUX POUR L'EAU

4.1.1. Formules empiriques

De nombreux auteurs, dont Prony, Flamant, Darcy et Lévy, ont proposé pour le calcul de ces pertes de charge des formules empiriques basées sur un certain nombre d'essais pratiques avec des types de tuyauteries et de joints ne correspondant plus aux fabrications modernes. D'autre part ces formules, d'application limitée, ne reflétaient pas la réalité physique des phénomènes et les résultats obtenus étaient parfois très approximatifs. Pour ces diverses raisons, elles ne sont plus guère utilisées.

La formule empirique de Williams et Hazen, bien que déjà ancienne, reste néanmoins en usage aux U.S.A. Elle est de la forme (en unités métriques)

$$J = 6{,}815 \left(\frac{V}{C_{wh}} \right)^{1{,}852} D^{-1{,}167}$$

le coefficient Cwh variant avec le diamètre des conduites et l'état de leur surface intérieure.

4.1.2. Formule de Colebrook résultant des expériences de Nikuradzé

avec:

$$J = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3{,}7\,D} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$$

J = perte de charge par frottement, en m de CE par m de tuyau.

? = coefficient de perte de charge.

D = diamètre du tuyau, ou diamètre hydraulique (voir § 4.5.B) pour les conduites non cylindriques, en m.

V = vitesse d'écoulement, en $m.s.^{-1}$

g = accélération de la pesanteur, en $m.s^{-2}$ (= 9,81 à paris).

k = coefficient de rugosité équivalente de la paroi, en m.

Re = nombre de Reynolds = $\frac{VD}{\nu}$,

où la viscosité cinématique v de l'eau en $m^2.s^{-1}$ a pour valeur, à la pression normale

t °C	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
v x10^6	1,792	1,52	1,31	1,14	1,006	0,80	0,66	0,56	0,48	0,41	0,36	0,33	0,30

- **Choix du coefficient de rugosité**

Ce choix préalable conditionne la précision du calcul des pertes de charge par frottement Pour les conduites véhiculant de l'eau, il est lié à la fois à la nature des parois, à leur évolution dans le temps, et aux caractéristiques physico-chimiques de l'eau véhiculée.

- **tuyauteries lisses** non corrodables et dépôts improbables.

Ces conditions sont réunies avec des eaux non chargées parcourant des tuyau-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

teries en matière plastique, fibro-ciment, ciment centrifugé ou tout matériau non corrodable ou pourvu d'un revêtement lisse de parfaite qualité. Le coefficient de rugosité à retenir dans la pratique est k = 0,1 mm, du fait des altérations minimes inévitables à terme, bien qu'on admette théoriquement k = 0,03 mm à l'état neuf. Pour l'ensemble des matériaux usuels, les coefficients de rugosité k sont les suivants, en conditions moyennes d'utilisation, joints compris

Matériau	k (mm)	Matériau	k (mm)
Acier neuf	0,1	Laiton-Cuivre-Plomb neufs	0,01
revêtement plastique revêtement lisse non poreux	0,03	Aluminium neuf	0,015-0,06
Fonte neuve	0,1-1	Béton neuf centrifugé	0,03
revêtement bitume	0,03-0,2	neuf/moules lisses	0,2-0,5
revêtement ciment	0,03-0,1	neuf/moules grossiers	1,0-2,0
Plastiques	0,03-0,1	Fibro-ciment neuf	0,03-0,1
		Grès vernissé	0,1-1

- **tuyauteries corrodables et dépôts probables**

Lorsque de telles tuyauteries sont parcourues par des eaux relativement agressives, corrosives, entartrantes ou chargées, on admet que le coefficient moyen de rugosité atteindra environ k = 2mm. Pour des eaux brutes non chlorées peu agressives et peu entartrantes, il devient k = 1 mm. Avec des eaux brutes peu chargées et des eaux filtrées qui ne sont ni agressives ni entartrantes et qui ont subi un traitement anti-algues, on peut admettre k = 0,5 mm.

Dans des conditions moyennes de qualité de l'eau, on peut également, en première approximation, adopter pour valeur J de la perte de charge dans les tables qui suivent, la moyenne arithmétique de celles trouvées dans les colonnes "tuyauterie neuve" et "tuyauterie encrassée".

- **Calcul suivant l'abaque universel**

Cet abaque (figure 247), valable pour les conduites industrielles à parois de rugosité hétérogène, donne les valeurs du coefficient ? à utiliser dans la formule de Colebrook en fonction du nombre de Reynolds Re correspondant aux conditions réelles de l'écoulement, et de la rugosité relative $\frac{k}{D}$ des parois.

Le tableau 58 donne les valeurs du rapport $\frac{\lambda}{D}$ tirées de l'abaque universel pour quelques valeurs usuelles du coefficient k.

Il permet de faciliter les calculs en déterminant globalement l'ensemble des pertes de charge par frottement et singulières ?h, exprimé en m de colonne d'eau,

$$\Delta h = JL + K\frac{V^2}{2g} = \left(\frac{\lambda}{D}L + K\right)\frac{V^2}{2g}$$

où:

L = longueur totale du tronçon, en m, à écoulement de vitesse V en $m.s^{-1}$..

K = somme des coefficients élémentaires de perte de charge dans les singularités successives de ce tronçon (voir § 4.2.).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Nota : si on appelle Le la longueur de conduite rectiligne équivalente aux singularités successives du tronçon, on a les relations suivantes

$$Le = \frac{K}{\frac{\lambda}{D}} \qquad \Delta h = \frac{\lambda}{D}(L + Le)\frac{V^2}{2g}$$

4.1.3. Canalisation déforme quelconque

Pour utiliser les formules précédentes, on utilise la notion de diamètre hydraulique Dh qui correspond au diamètre du tuyau cylindrique équivalent.

Si S est la section de la canalisation, p son périmètre :

$$Dh = \frac{4S}{p}$$

Pour une canalisation de section rectangulaire de cotes a et b

$$Dh = \frac{2\,ab}{a + b}$$

4.1.4. Canalisations circulaires non pleines

Soient

- q ($l.s^{-1}$) le débit évacué par une canalisation de diamètre D de pente p ($mm.m^{-1}$) et remplie à X % de son diamètre,
- Q ($l.s^{-1}$) le débit évacué par une canalisation de diamètre D débitant à pleine section avec une perte de charge p ($mm.m^{-1}$) égale à la pente.

Connaissant D et p (donc Q) le débit cherché q est donné par la relation

$$Q = mQ$$

m étant donné par le tableau ci-dessous en fonction de X.

X (%)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
m	0.08	0.13	0.185	0.25	0.32	0.40	0.50	0.58	0.67	0.74	0.82	0.89

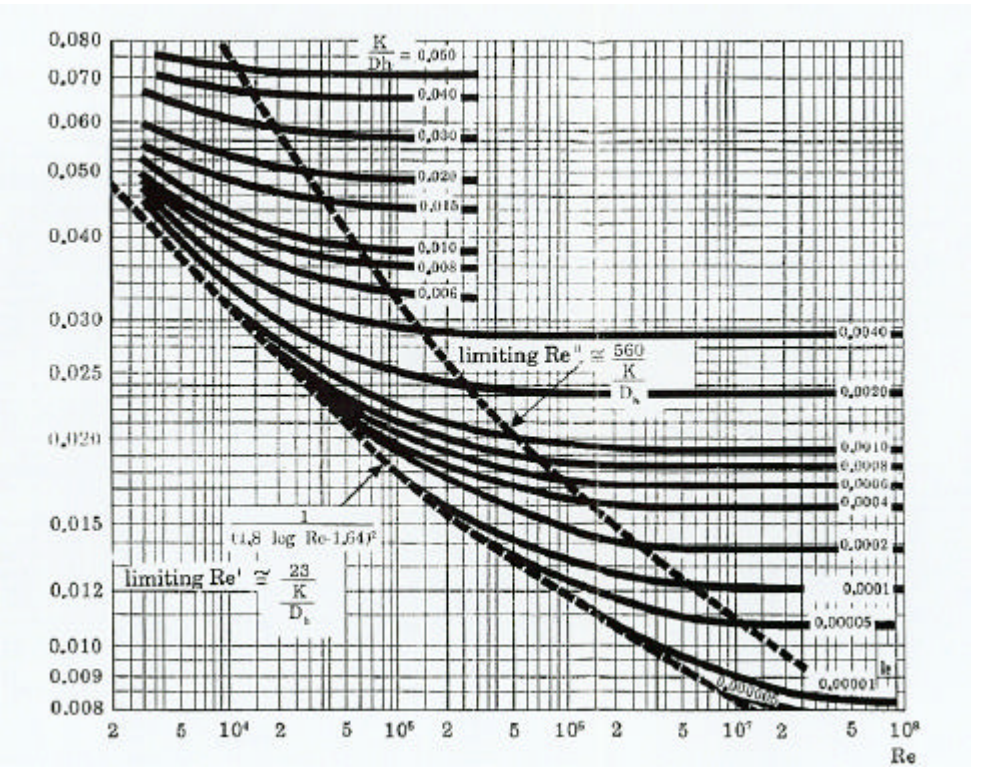


Figure 247. Abaque universel des pertes de charge par frottement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 58. Variation du rapport $\frac{\lambda}{D}$

Diamètre mm	**Coefficient $\frac{\lambda}{D}$ pour une rugosité égale à :**			
	k= 0,1 mm	**k=0,5 mm**	**km = 1 mm**	**k=2mm**
0,025	1,26	2	2,84	
0,030	1,02	1,54	2,00	2,71
0,040	0,700	1,04	1,34	1,80
0,050	0,528	0,78	0,985	1,30
0,065	0,35	0,500	0,615	0,80
0,080	0,290	0,413	0,512	0,660
0,100	0,222	0,310	0,380	0,490
0,125	0,168	0,232	0,284	0,360
0,150	0,133	0,182	0,223	0,280
0,200	0,0935	0,128	0,153	0,190
0,250	0,0710	0,096	0,114	0,141
0,300	0,0573	0,076	0,090	0,110
0,350	0,0475	0,0625	0,0735	0,0900
0,400	0,0400	0,0530	0,0625	0,0758
0,450	0,0351	0,0460	0,0538	0,0650
0,500	0,0308	0,040	0,047	0,0566
0,600	0,0245	0,0322	0,0371	0,0477
0,700	0,0206	0,0266	0,0307	0,0368
0,800	0,0175	0,0225	0,0260	0,0310
0,900	0,0151	0,0194	0,0225	0,0267
1,000	0,0134	0,0170	0,0197	0,0234
1,100	0,01163	0,015	0,01754	0,0209
1,200	0,0104	0,01358	0,01583	0,01875
1,250	0,0102	0,0130	0,0150	0,0177
1,300	0,00946	0,0123	0,0142	0,01676
1,400	0,00878	0,01128	0,01307	0,01535
1,500	0,00827	0,104	0,0120	0,0140
1,600	0,00737	0,00956	0,01106	0,0131
1,700	0,00694	0,00882	0,0103	0,01235
1,800	0,00655	0,00833	0,00966	0,0111
1,900	0,00605	0,00773	0,00894	0,0104
2,000	0,00586	0,00735	0,0084	0,00980
2,100	0,00538	0,00690	0,00785	0,00928
2,200	0,00513	0,0065	0,00740	0,00881
2,300	0,00491	0,00621	0,00708	0,00834
2,400	0,00466	0,00591	0,00675	0,00791
2,500	0,00453	0,0056	0,0064	0,00745
Gamme des vitesses avec bonne approximation	1 à 3 $m.s^{-1}$	1 à 3 $m.s^{-1}$	= lm.s 1	= 0,5 $m.s^{-1}$

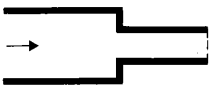
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2. PERTES DE CHARGE SINGULIÈRES DANS LES TUYAUTERIES, RACCORDS, VANNES, ETC., POUR L'EAU

A. Rétrécissement brusque.

$$\Delta h = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right)\frac{V^2}{2\,g}$$

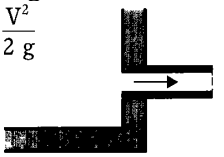
?h = perte de charge, en mètres d'eau.
V = vitesse moyenne après rétrécissement, en $m.s^{-1}$,
g = accélération de la pesanteur = 9,81 $m.s^{-2}$,
D_1= diamètre du tuyau avant rétrécissement, en m
D_2= diamètre du tuyau après rétrécissement, en m.



- **Cas particulier: départ d'une conduite**

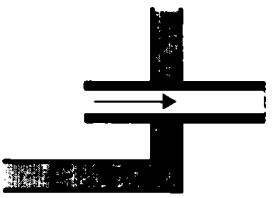
à partir d'un grand réservoir

a) $\Delta h = \frac{1}{2}\frac{V^2}{2\,g}$



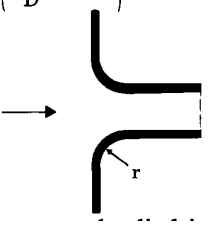
b) Avec saillie à l'intérieur du réservoir (saillie supérieure au 1/2 diamètre)
Ah = V

$$\Delta h = \frac{V^2}{2\,g}$$



c) Avec raccord à bords arrondis

$$\left(si\frac{r}{D} > 0{,}18\right)\ \Delta h = 0{,}05\ \frac{V^2}{2\,g}$$

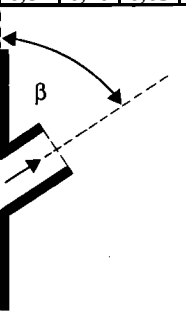


d) Avec raccord cylindrique oblique

$$\Delta h = K\ \frac{V^2}{2\,g}$$

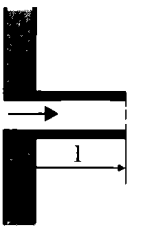
avec $K = 0{,}5 + 0{,}3\cos ß + 0{,}2\cos^2 ß$

ß	20°	30°	45°	60°	70°	80°	90°
K	0,96	0,91	0,81	0,70	0,63	0,56	0,50



e) Avec ajustage débitant à gueule bée

$$\Delta h = 1{,}5\ \frac{V^2}{2\,g}$$



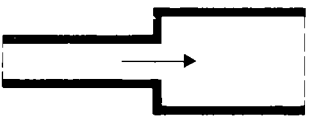
pour $2\,D < l < 5\,D$

B. Élargissement brusque

$$\Delta h = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2\,g} = \frac{V_1^2}{2\,g}\left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

V1 = vitesse moyenne avant élargissement, en $m.s^{-1}$.
V_2 = vitesse moyenne après élargissement, en $m.s^{-1}$
D1 = diamètre du tuyau avant élargissement, en m.
D2 = diamètre du tuyau après élargissement, en m.

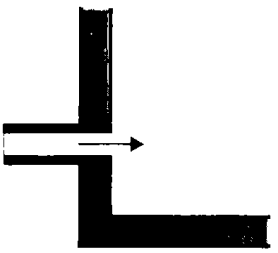


- **Cas particulier: arrivée d'une conduite dans un grand réservoir.**

$$\Delta h = \frac{V^2}{2\,g}$$

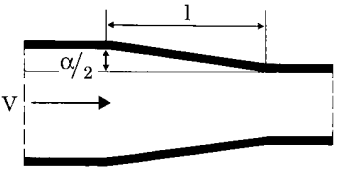
En général on a même davantage

$$\Delta h = \alpha\,\frac{V^2}{2\,g} \text{ avec } 1{,}06 < \alpha < 1{,}1$$



C. Cône convergent

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2$$



a) Perte par frottement ($?h_l$)

Évaluer la perte de charge Ah',, dans un tuyau cylindrique de même longueur et de section égale à la grande section;

$$\Delta h_1 = x\ \Delta h'_1$$

$$\text{avec } x = \frac{n(n^4 - 1)}{4(n - 1)}$$

$$\text{où } n = \frac{D}{d}$$

D : diamètre d'entrée. d : diamètre de sortie.

b) Perte par décollement ($?h_2$)

$$\Delta h_2 = K\,\frac{V^2}{2\,g}$$

V= vitesse calculée dans la grande section, en $m.s^{-1}$

Valeurs de K :

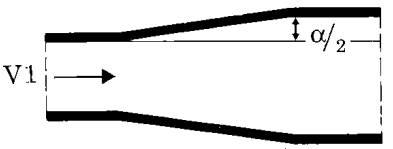
$n = \frac{D}{d}$	1,15	1,25	1,50	1,75	2	2,5
Angle au sommet						
6^0	0,006	0,018	0,085	0,23	0,5	1,5
8^0	0,009	0,028	0,138	0,373	0,791	2,42
10^0	0,012	0,04	0,2	0,53	1,05	3,4
15^0,	0,022	0,07	0,344	0,934	1,98	6,07
20^0	0,045	0,12	0,6	1,73	3,5	11
30^0	0,28	0,25	1,25	3,4	7	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

D. Cône divergent
Formule de Lorenz:

$$\Delta h = \left(\frac{4}{3}\,\mathrm{tg}\,\frac{\alpha}{2}\right)\frac{V_1^2}{2\,g}$$

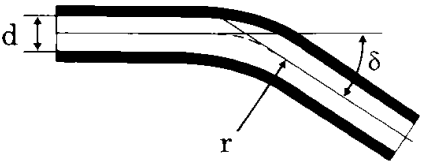
avec:
a = angle au sommet du divergent.
V1 = vitesse dans le tuyau avant le divergent.



E. Coudes
a) Coudes arrondis:

$$\Delta h = K\,\frac{V^2}{2\,g}$$

Valeurs de K r= rayon de courbure du coude, en mètres. d= diamètre du tuyau, en mètres.



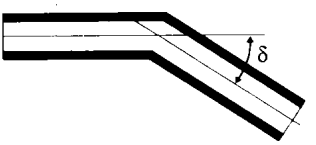
r/d	1	1,5	2	3	4
d= 22°5	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08
d = 45°	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15
d = 60°	0,25	0,22	0,21	0,20	0,19
d = 90°	0,33	0,29	0,27	0,26	0,26
d = 135°	0,41	0,36	0,35	0,35	0,35
d = 180°	0,48	0,43	0,42	0,42	0,42

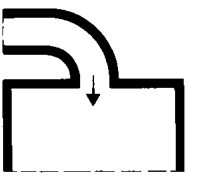
Coude débouchant dans un réservoir plein (K total)

d = 90°	0.68	1.64	1.62	1.61	1.61

Pour une « courbe 3 d »

$2\,r = 3\,d$, soit $\frac{r}{d} = 1{,}5$





b) Coudes brusques

$$\Delta h = K\,\frac{V^2}{2\,g}$$

d	22° 5	30°	45°	601)	75°	90°
K	0,17	0,20	0,40 I	0,70	1,00	1,50

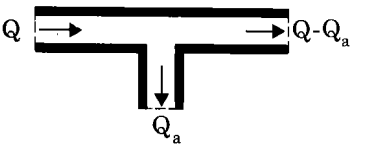
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

F. Pièces en T

On suppose que
- les branchements ont le même diamètre que le tuyau principal;
- les raccords sont à angles vifs.

a) Branchement de départ

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2\,g}$$

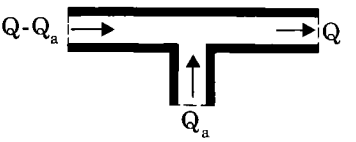


Q = débit total en $m^3.s^{-1}$
Q_a = débit dans le branchement de départ en $m^3.s^{-1}$.
V = vitesse du courant total en $m.s^{-1}$
Kb = coefficient relatif au branchement.
Kr = coefficient relatif à la partie rectiligne.

$\frac{Qa}{Q}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Kb	(1,0)	1,0	1,01	1,03	1,05	1,09	1,15	1,22	1,32	1,38	1,45
Kr	0	0,004	0,02	0,04	0,06	0,10	0,15	0,20	0,26	0,32	(0,40)

b) Branchement d'amenée

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2\,g}$$



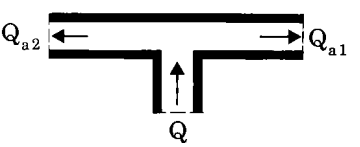
Q = débit total en mètres cubes par seconde.
Q_a = débit dans le branchement d'amenée, en $m^3.s^{-1}$.

$\frac{Qa}{Q}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Kb	(-0,60)	- 0,37	- 0,18	- 0,07	+ 0,26	0,46	0,62	0,78	0,94	1,08	1,20
Kr	0	0,16	0,27	0,38	0,46	0,53	0,57	0,59	0,60	0,59	0,55

c) T symétrique, séparation des courants: (T en acier soudé)

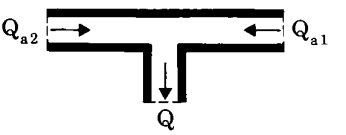
$$Kr_1 = 1 + 0{,}3 \left(\frac{Qa_1}{Q}\right)^2$$

$$Kr_2 = 1 + 0{,}3 \left(\frac{Qa_2}{Q}\right)^2$$



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

d) T symétrique, réunion des courants



$$Kr_1 = 2 + 3\left[\left(\frac{Qa_1}{Q}\right)^2 - \frac{Qa_2}{Q}\right]$$

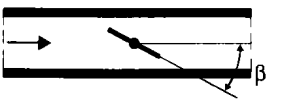
$$Kr_2 = 2 + 3\left[\left(\frac{Qa_2}{Q}\right)^2 - \frac{Qa_1}{Q}\right]$$

G. Vannes et robinets.

$$\Delta h = K\,\frac{V^2}{2\,g}$$

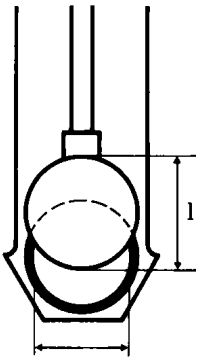
a) Vannes tournantes ou papillons

Le coefficient de perte de charge suivant le degré d'ouverture de la vanne dépend du profil hydrodynamique du papillon: le tableau ci-après donne, à titre indicatif, quelques valeurs usuelles, mais il est bon de se reporter aux tables des fabricants pour plus de précision.



ß	0° - 5°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°
K	0,25à 0,30	0 52	1,54	3,91	10,8	18,7	32,6	118	751

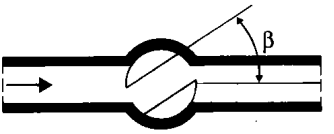
b) Robinets vannes



Valeur de l'abaissement de l'opercule $\frac{1}{d}$	0	$\frac{1}{8}$	$\frac{2}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{4}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{6}{8}$	$\frac{7}{8}$
K	0,12	0,15	0,26	0,81	2,06	5,52	17	98

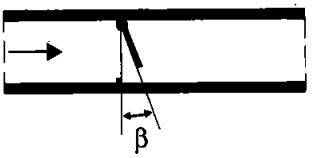
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

c) Robinets à boisseau



(3	10°	20°	30°	401,	45°	501,	55°
K	0,31	1,84	6,15	20,7	41	95,3	275

d) Clapets à battant



	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°	70°
K	90	62	42	30	20	14	9,5	6,6	3,2	1,7

H. Vannes ouvertes et raccords.

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g}$$

	K usuel	**Variations de K**
Vanne à sièges parallèles	0,12	0,08 à 0,2
Vanne à sièges obliques		0,15 à 0,19
Vanne d'angle		2,1 à 3,1
Vanne à pointeau		7,2 à 10,3
Robinet à soupape droit	6	4 à 10
Robinet à soupape d'équerre		2 à 5
Robinet à flotteur	6	
Robinet à boisseau		0,15 à 1,5
Clapet de retenue à battant	2 à 2,5	1,3 à 2,9
Clapet de pied (crépine exclue)	0,8	
Raccordement par manchon		0,02 à 0,07

Coefficients C_v d'une vanne

Pour certaines vannes et en particulier les vannes de régulation, la tendance est actuellement de donner, non plus la perte de charge sous cette forme, mais le œefficient de débit C_v pour les différentes ouvertures. Par définition, C_v est le débit d'eau de densité 1 exprimé en U.S. g.p.m, qui s'écoule au travers de la section contractée pour une perte de charge de 1 p.s.i., ce qui correspond sensiblement au débit d'eau en litres par min créant une perte de charge de 5 mbar, soit 0,05 m de CE.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Pour de l'eau on a donc

$$C_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}}$$

avec Q = débit en U.S. gpm,
?h = perte de charge p.s.i.

soit en unités décimales

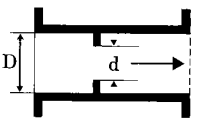
$$C_v = 13{,}3\ \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}}$$

avec Q = débit en $l.s^{-1}$
?h = perte de charge en m de CE.

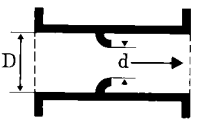
4.3. CALCUL DES SYSTÈMES DEPRIMOGENES

Tubes de Venturi

Diaphragmes



Tuyères



A. Calcul approché

$$h = K\frac{\varrho}{1000}\ \frac{V^2}{2\,g}\ (m^2 - 1),$$

soit

$$\frac{D^2}{d^2} = m = \sqrt{\frac{1000\ 2\ gh}{K\rho V^2} + 1}$$

avec:
h = dépression créée par le dispositif, en mètres d'eau à 4 °C (masse volumique 1000 $kg.m^{-3}$).

K = coefficient expérimental (voisin de 1).
? = masse volumique du fluide dans les conditions réelles d'écoulement, en $kg.m^{-3}$
V = vitesse du fluide à l'entrée du dispositif en $m.s^{-1}$
g =accélération de la pesanteur, 9,81 $m.s^{-2}$.
D = diamètre du tuyau, en mètre.
d = diamètre de la veine liquide à son étranglement maximal, en mètre.
m = rapport de la section du tuyau à la section de la veine liquide à son étranglement maximal.

- **Calcul de l'ouverture d'un diaphragme:** le diamètre réel d_o de l'orifice

d'un diaphragme est égal à = $\frac{d}{0{,}8}$.

- **Perte de charge d'un diaphragme** (pour Re > 10^5)

$$h = \frac{K}{1000}\ \frac{V^2}{2\,g}$$

avec

$$K = \left(1 + 0{,}707\ \sqrt{1 - \frac{d_0^2}{D^2}} - \frac{d_0^2}{D^2}\right)^2 \left(\frac{D^2}{d_0^2}\right)^2$$

pour un diagramme à bords effilés dont le diamètre d'orifice est d_0 exprimé avec la même unité que le diamètre intérieur de conduite D.

B. Calcul précis d'un système déprimogène de mesure: voir normes françaises NF X-10.101, NF X-10.102 et NF X-10.110.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Conditions d'installation: les diaphragmes, tuyères et venturi tuyères doivent être placés sur une canalisation droite, la portion amont ayant une longueur au moins égale à 10 D et la portion aval une longueur supérieure à 5 D, ces minima étant encore accrus pour les faibles étranglements. Pour les venturi classiques la longueur droite amont minimale n'est que de 1,5 à 6 D suivant le degré d'étranglement (norme X 10.102 p. 9 et 10).

La longueur d'un tube venturi est déterminée par les coefficients de forme normalisés (norme ci-dessus) et par le choix de l'étranglement D -d.

4.4. DÉBIT DES ORIFICES ET AJUTAGES

Débit $Q = kS\sqrt{2gh}$ $(m^3.s^{-1})$.

Vitesse moyenne $V = k\sqrt{2gh}$ $(m.s^{-1})$.

Avec

S = surface de l'orifice mesurée à sa section extrême extérieure (en m2).

g = accélération de lapesanteur 9,81 ms Z.

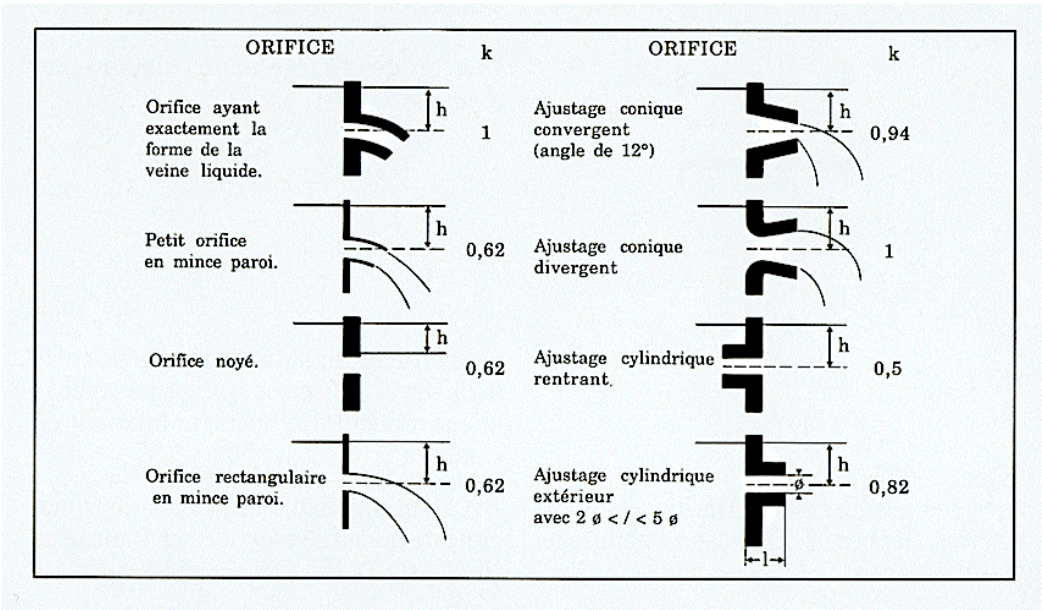
h = charge sur l'orifice mesurée du niveau amont du liquide jusqu'au centre de gravité de l'orifice (en m).

Entre le coefficient k utilisé ici et le coefficient K défini au § 4.2 existe la relation $k = k^{-2}$

Formule simplifiée pour k = 0,62 :

$$\underset{(m^3.h^{-1})}{Q} \cong \underset{(cm^2)}{S} \quad \underset{(m)}{\sqrt{h}}$$

- **Tube de Pitot:** ce mode de mesure des débits, bien qu'il ne soit pas normalisé, est fréquemment utilisé chaque fois que la construction ou la mise en place d'un organe déprimogène est difficile. Pour les mesures en conduite, l'extrémité recourbée du tube de Pitot réalisant les prises de pression est généralement placée suivant l'axe de la conduite.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La pression différentielle h_c obtenue représente la différence entre la pression statique et la pression totale, donc la pression dynamique vraie au point de prise de pression. Si V_c est la vitesse ponctuelle d'écoulement suivant l'axe, en ms' et V_m la vitesse moyenne d'écoulement, en $m.s^{-1}$ dans la section de diamètre D, en m, pour le débit Q en $m^3.s^{-1}$ d'un fluide de masse volumique p, en $kg.m^{-3}$, la pression différentielle a pour valeur, en mm de colonne d'eau :

$$h_c = \rho \frac{V_c^2}{2\,g} = \rho \left[\frac{0{,}2874\ Q}{D^2 \dfrac{V_m}{V_c}} \right]^2$$

où la masse volumique, dans les conditions de température absolue T, et de pression absoolue P d'écoulement, se déduit de ?*o* dans les conditions normales par la formule

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T}$$

Lorsque l'écoulement est symétriquement réparti dans la section grâce à des longueurs droites suffisantes, le diagramme de la figure 248 donne les valeurs de Vm/Vcen fonction du nombre de Reynolds Re.

Pour les faibles valeurs de Re, une vitesse moyenne doit être recherchée en déplaçant le tube de Pitot dans la section d'écoulement.

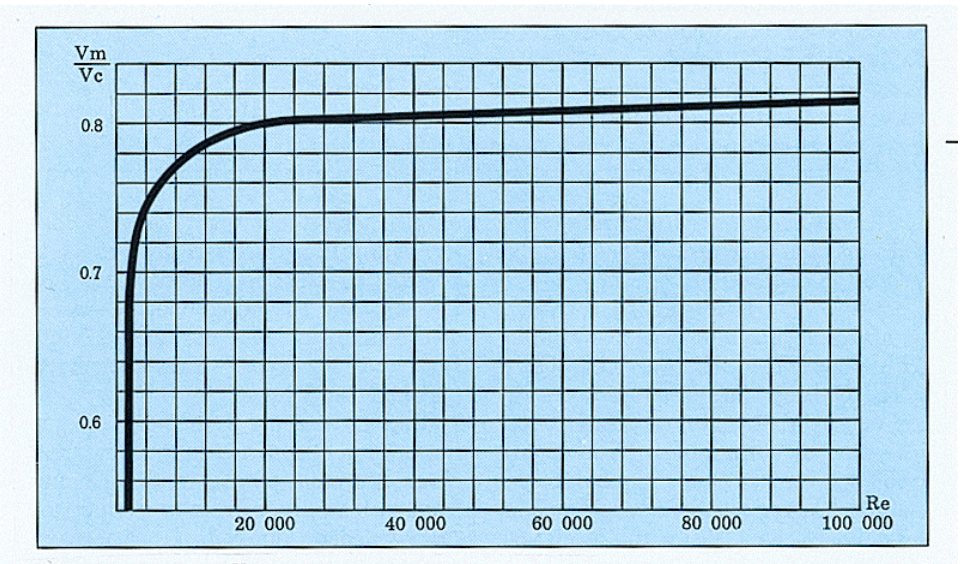


Figure 248. Valeurs de Vm/Vc pour les mesures au tube de Pitot

4.5. ÉCOULEMENT DE L'EAU DANS LES CANAUX

A. Formules empiriques de calcul des pertes de charge par frottement.

Seules les formules suivantes restent encore d'un usage courant pour le calcul des pertes de charges par frottement, la formule de Manning-Strickler tendant à se généraliser en raison de sa simplicité et de son application générale à toutes les

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

formes d'écoulement uniforme en canaux ou rivières

Formule de Bazin

$$V = \frac{87\sqrt{RI}}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}}$$

Formule de Manning-Strickler

$V = K_s R^{2/3} I^{1/2}$

où:

V = vitesse moyenne de l'écoulement dans la section, en $m.s^{-1}$;

R = rayon hydraulique ou rayon moyen, en m, égal au rapport de la section liquide dans le canal (m^2) au périmètre mouillé (m) ;

I = pente du canal, en mètre par mètre;

y et K_S = constantes de rugosité des parois.

Nature des parois	?	K_s
Parois très unies (enduit de ciment lissé, bois raboté)	0,06	100
Parois avec enduit de ciment ordinaire	-	90
Parois unies (briques, pierre de taille, béton brut)	0,16	70-80
Parois peu unies (moellons)	0,46	60-70
Parois de nature mixte (talus dressés ou perreyés)	0,85	50-60
Canaux en terre (talus ordinaires)	1,30	40
Canaux en terre avec fond de galets et parois herbeuses	1,75	25-35

La nature et la consistance des parois peuvent limiter la vitesse maximale admissible à proximité de celles-ci.

Le régime critique est atteint en canal de section rectangulaire de largeur I pour une hauteur d'eau H_c telle que $Q^2 = gl^2H^3_c$ au débit Q (soit une vitesse critique $V_c = \sqrt{gH_c}$).

Aux vitesses supérieures, l'écoulement est torrentiel: il obéit à des lois complexes et doit faire l'objet d'études spéciales (modèles mathématiques, maquettes, etc.). En-deçà, l'écoulement est dit fluvial avec $H > H_c$ et $V < V_c$ Dans les ouvrages de traitement d'eau, l'écoulement est le plus souvent de type fluvial; ces deux inégalités précédentes doivent donc être vérifiées.

En écoulement fluvial uniforme, la section mouillée et la vitesse sont constantes dans les profils successifs, les pertes de charge par frottement étant exactement compensées par la pente. L'application de la formule de Bazin ou de Manning-Strickler reliant la vitesse, le rayon hydraulique et la pente, permet de calculer l'une de ces valeurs connaissant les deux autres, c'est-à-dire trois des quatre paramètres suivants: débit, section mouillée, périmètre mouillé et pente.

A partir du niveau normal d'équilibre ainsi précisé, les surélévations locales du niveau, ou ressauts, résultants soit de mises en vitesse soit de restitutions d'énergie du fait de singularités, doivent être calculées comme indiqué au paragraphe C ci-dessous.

Dans les ouvrages de traitement d'eau où les longueurs droites sont généralement faibles, les variations de niveau dans les singularités ont une grande importance relative.

B. Emploi de l'abaque universel

Cet abaque (figure 247) donnant ? coefficient de perte de charge par frottements,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

s'applique également aux canaux à parois de rugosité hétérogène. Pour les canaux en béton, le coefficient de rugosité k est en moyenne de 0,5 mm (enduit lisse) à 2 mm (béton brut en conditions moyennes). La méthode de calcul est la même qu'en conduites (§ 4.1.2) en utilisant le diamètre hydraulique :

$$Dh = \frac{4\,S}{p_m}$$

S étant la section de canal occupée par l'eau et p_m le périmètre mouillé, exprimés m^2 où m

C. Calcul des pertes de charges singulières

Le calcul se conduit comme pour les tuyaux (§ 4.2), à partir de l'aval et pour la vitesse de l'écoulement fluvial uniforme obtenu. Les ressauts locaux amont traduisent les pertes de charge dans les singularités.

D. Perte de charge à travers une grille

$$\Delta h = K_1.K_2.K_3.\frac{V^2}{2\,g}$$

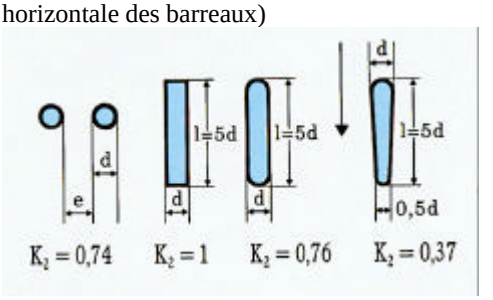
V = vitesse d'approche dans le canal, en $m.s^{-1}$

- **Valeur de K_1** (encrassement).

- grille propre $K_1 = 1.$
- grille encrassée $K_1 = \left(\frac{100}{m}\right)^2$

Où m est le pourcentage de section de passage subsistant à l'encrassement maximal toléré.

- **Valeurs de K2** (forme de la section horizontale des barreaux)



- Valeurs de K3 (section de passage entre barreaux).

$\frac{1}{4}\left(\frac{2}{e}+\frac{1}{h}\right)$	$\frac{e}{e+d}$									
4 e h	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	245	51,5	18,2	8,25	4,0	2,0	0,97	0,42	0,13	0
0,2	230	48	17,4	7,70	3,75	1,87	0,91	0,40	0,13	0,01
0,4	221	46	16,6	7,40	3,60	1,80	0,88	0,39	0,13	0,01
0,6	199	42	15	6,60	3,20	1,60	0,80	0,36	0,13	0,01
0,8	164	34	12,2	5,50	2,70	1,34	0,66	0,31	0,12	0,02
1	149	31	11,1	5,00	2,40	1,20	0,61	0,29	0,11	0,02
1,4	137	28,4	10,3	4,60	2,25	1,15	0,58	0,28	0,11	0,03
2	134	27,4	9,9	4,40	2,20	1,13	0,58	0,28	0,12	0,04
3	132	27,5	10,0	4,50	2,24	1,17	0,61	0,31	0,15	0,05

e = espacement entre barreaux.
d = largeur des barreaux.
1 = épaisseur des barreaux.
h = hauteur immergée des barreaux, verticale ou oblique.
Ces différentes valeurs sont à exprimer avec la même unité.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

E. Vitesse d'entraînement de quelques matériaux

- Profondeur d'eau 1 m, canaux rectilignes

	Diamètre en mm			Vitesse moyenne ms^{-1}		
Vase	0,005	-	0,05	0,15	-	0,20
Sable fin	0,050	-	0,25	0,20	-	0,30
Sable moyen	25	-	1,00	0,30	-	0,55
Argiles non compactées	--	-		0,30	-	0,40
Sable gros	1,00	-	2,5	0,55	-	0,65
Gravier fin	2,5	-	5	0,65	-	0,80
Gravier moyen	5	-	10	0,80	-	1,00
Gravier gros	10	-	15	1,00	-	1,20

- Corrections pour autres profondeurs d'eau

H (m)	0,3	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5
k	0,8	0,9	0,95	1,0	1,1	1,2

4.6. DÉVERSOIRS

Le débit des déversoirs est donné par la formule générale :

$$Q = \mu l h \sqrt{2gh}$$

où:

Q = débit, en $m^3.s^{-1}$ (ou $l.s^{-1}$)

μ = coefficient de débit du déversoir

1 = longueur du seuil déversant, en m

h = hauteur de lame, en m (ou cm)

g = accélération de la pesanteur, en $m.s^{-2}$ (= 9,81 à Paris).

On désigne par ailleurs par P, la "pelle" ou hauteur du seuil au-dessus du fond amont, et par L la largeur du canal à l'amont du déversoir.

A. Déversoir rectangulaire en mince paroi avec vitesse d'approche faible

$\mu \simeq 0.40$

dans le cas d'une sortie de réservoir par exemple.

- Cas particulier du déversoir de trop-plein circulaire

$\mu \simeq 0{,}34$

pour un trop-plein de diamètre 0,20 m < Ø < 0,70 m avec entonnement suffisant pour éviter toute réaction de l'aval.

B. Déversoir rectangulaire en mince paroi sur un canal

- **Déversoir sans contraction latérale** (1 = L), avec écoulement à nappe libre (figure 249)

Un déversoir est ainsi défini quand l'épaisseur e du seuil est moindre que la moitié de la charge h, quand l'écoulement est tel qu'il laisse un espace ? rempli d'air à pression atmosphérique entre la lame et la paroi aval du seuil, et quand la largeur de la lame déversante est exactement la même que celle du canal.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le coefficient de débit μ est donné par l'une des formules suivantes

- Formule de BAZIN (1898), d'un emploi général en France:

$$\mu_1 = 0{,}405 + \frac{0{,}003}{h}\left[1 + 0{,}55\ \frac{h^2}{(h+P)^2}\right]$$

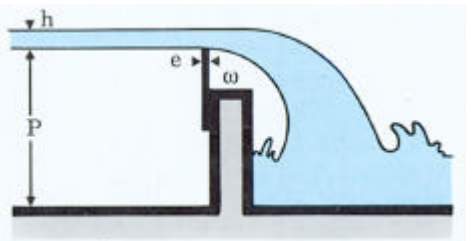


Figure 249.

-Formule proposée par la Société des Ingénieurs et Architectes Suisses (S.I.A.) :

$$\mu_2 = 0{,}410\left[1 + \frac{1}{1000\,h + 1{,}6}\right]\left[1 + 0{,}5\,\frac{h^2}{(h+P)^2}\right]$$

Ces formules, avec h et P exprimées en m, sont utilisables pour des hauteurs de lame h comprises entre 0,10 m et 0,60 m pour la formule de Bazin, et entre 0,025 m et 0,80 m pour celle de la S.I.A., cette dernière donnant des résultats légèrement inférieurs à ceux obtenus par la formule de Bazin.

Autres conditions d'application

- pour Bazin :P compris entre 0,20 et 2 m
- pour S.I.A : P supérieur à h.

Enfin, la mesure de h se fera à une distance du seuil au moins égale à cinq fois la hauteur maximale de lame. Si l'aération sous la nappe est insuffisante (nappe déprimée), le débit est accru et sa loi mal définie, ce qui n'est pas admissible pour un déversoir de mesure.

Débit en l.s^{-1} par m de longueur de seuil selon Bazin([1])

Hauteur lame h (m)	Hauteur de pelle P en mètres								
	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	1,50	2,00
0,10	64,7	63,0	62,3	61,9	61,6	61,3	61,2	61,1	61,0
0,12	85,3	82,7	81,5	80,8	80,4	79,9	79,7	79,4	79,3
0,14	108,2	104,4	102,6	101,5	100,9	100,1	99,8	99,3	99,2
0,16	133,2	128,1	125,5	124,0	123,0	122,0	121,4	120,7	120,5
0,18	160,2	153,7	150,2	148,1	146,8	145,3	144,5	143,5	143,2
0,20	189,3	181,0	176,6	173,9	172,1	170,0	168,9	167,7	167,1
0,22	220,2	210,2	204,6	201,2	198,9	196,2	194,8	193,1	192,4
0,24	253,0	241,0	234,2	230,0	227,2	223,8	221,9	219,7	218,8
0,26	287,6	273,6	265,5	260,3	256,9	252,7	250,3	247,5	246,4
0,28	323,9	307,8	298,2	292,1	288,0	282,9	280,0	276,5	275,1
0,30	361,8	343,6	332,5	325,4	320,5	314,4	310,9	306,6	304,9
0,32		380,9	368,3	360,1	345,3	347,2	343,0	337,9	335,7
0,34		419,8	405,6	396,1	389,5	381,2	376,2	370,2	367,2
0,36		460,1	444,2	433,5	426,0	416,4	410,7	403,6	400,5
0,38		502,0	484,3	472,3	463,8	452,8	446,3	438,0	434,4
0,40		545,2	525,8	512,4	502,9	490,5	483,0	473,5	469,3
0,45		659,4	635,3	618,3	606,0	589,6	579,6	566,5	560,6
0,50			752,9	732,1	716,7	696,0	682,9	665,7	657,8
0,55			878,2	853,4	834,8	809,2	792,9	770,9	760,5
0,60			1011,1	982,1	960,0	929,2	909,3	881,9	868,7

1. Déversoirs rectangulaires en mince paroi sans contraction latérale.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Débit en l.s^{-1} par m de longueur de seuil selon la S.I.A. (l)

Hauteur lame h (m)	Hauteur de pelle P en mètres									
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	2,00	3,00
0,02	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
0,04	15,5	15,1	15,0	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9
0,06	29,0	27,8	27,5	27,4	27,3	27,2	27,2	27,2	27,1	27,1
0,08	45,7	43,3	42,5	42,2	42,0	41,9	41,8	41,7	41,6	41,6
0,10		61,2	59,8	59,2	58,8	58,6	58,3	58,2	58,1	58,0
0,12		81,5	79,2	78,1	77,5	77,2	76,8	76,5	76,2	76,2
0,14		103,9	100,6	99,0	98,1	97,5	96,9	96,5	96,0	95,9
0,16		128,5	124,0	121,7	120,4	119,5	118,6	118,1	117,3	117,1
0,18		155,1	149,2	146,2	144,3	143,2	141,8	141,1	139,9	139,7
0,20			176,3	172,3	169,9	168,3	166,5	165,5	163,9	163,5
0,22			205,1	200,1	197,0	195,0	192,6	191,3	189,2	188,7
0,24			235,6	229,5	225,7	223,1	220,1	218,4	215,6	215,0
0,26			267,7	260,4	255,8	252,7	248,9	246,3	243,3	242,4
0,28			301,5	292,9	287,4	283,7	279,1	276,5	272,0	271,0
0,30				326,9	320,4	316,0	310,5	307,4	301,9	300,6
0,32				362,3	354,9	349,7	343,2	339,4	332,9	331,3
0,34				399,2	390,7	384,7	377,1	372,1	364,9	362,9
0,36				437,5	427,8	421,0	412,3	407,1	397,9	395,6
0,38				477,1	466,3	458,6	448,6	442,7	431,9	429,2
0,40					506,0	497,4	486,1	479,3	466,9	463,7
0,45					611,0	599,9	585,0	575,9	558,7	554,1
0,50						709,8	690,9	679,1	656,2	649,9
0,55						826,9	803,6	788,8	759,3	751,0
0,60							923,0	904,8	867,9	857,1
0,65							1048,9	1027,1	981,8	968,2
0,70							1181,0	1155,4	1100,9	1084,1
0,75							1319,3	1289,5	1225,0	1204,7
0,80								1429,5	1354,1	1329,9

1. Déversoirs rectangulaires en mince paroi sans contraction latérale.

- **Déversoir avec contraction latérale**

La S.I.A. a proposé pour μ la formule suivante

$$\mu = \left[0{,}385 + 0{,}025\left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{2{,}410 - 2\left(\frac{l}{L}\right)^2}{1000\,h + 1{,}6}\right] \times \left[1 + 0{,}5\left(\frac{l}{L}\right)^4 \left(\frac{h}{h+P}\right)^2\right]$$

lorsque $P \geqslant 0{,}30$ m ; $l > 0{,}31\,L$;
$0{,}025\,\frac{L}{l} \leqslant h \leqslant 0{,}80$ m ; $h \leqslant P$.

A signaler la formule simplifiée de Francis
$Q = 1{,}83\,(1 - 0{,}2\,h)\,h^{3/2}$
pour laquelle la surlargeur de part et d'autre du seuil doit être au moins égale à 3 h, la hauteur de lame étant mesurée à 2 m au moins vers l'amont.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

C. Déversoir triangulaire en mince paroi

$$Q = \frac{4}{5}\,\mu\, h^2 \sqrt{2\,gh}\, tg\,\frac{\Theta}{2}$$

où:
Q = débit, en $m^3.s^{-1}$
μ = coefficient de débit du déversoir rectangulaire de Bazin en mince paroi sans contraction latérale (voir § 4.6.B)
h = hauteur de lame, en m
? = angle au sommet du déversoir.

Le débit d'un déversoir triangulaire peut se déduire du débit du déversoir rectangulaire sans contraction latérale, à hauteur de lame et pelle identique, en multipliant ce débit par

$$\frac{4}{5}\, h\, tg\,\frac{\Theta}{2}$$

Pour ? = 90 °, la formule de Thompson est parfois utilisée :

$$Q = 1{,}42\; h^{\frac{5}{2}}$$

Cette formule est très approximative car elle ne tient pas compte de l'incidence de la pelle

.

4.7. PERTES DE CHARGE POUR UN FLUIDE QUELCONQUE

La formule générale des pertes de charge, en conduites de section quelconque comme en canaux, est de la forme:

$$?h = ?h_0 + ?h_1 + ...$$

En écoulement turbulent

$$\underbrace{\Delta h_0 = J_0\, L_0}_{\text{(frottements)}} \quad + \quad \underbrace{10^{-5}\, K_o\, \rho\, \frac{v_0^2}{2}}_{\text{(singularités)}}$$

$$\text{avec } J_0 = 10^{-5}\, \rho\, \frac{\lambda}{D_h}\, \frac{v_0^2}{2}$$

En écoulement laminaire, la formule donnant $?h_0$ est la même avec

$$J_0 = 10^{-5}\, \frac{64}{Re\, D_h}\, \rho\, \frac{v_0^2}{2},\, K_0$$

ayant alors des valeurs particulières à calculer à l'aide d'ouvrages spécialisés

Signification des symboles :
?h = perte de charge totale, en bars
$?h_1$, $?h_2$, etc. = pertes de charge élémentaires par tronçons de vitesse respective constante v_0, v_1, etc.
J_0 = coefficient de perte de charge par frottement, en bais par mètre de longueur de conduite (ou canal) à la vitesse v_0
L_0 = longueur de conduite (ou canal), en m, à vitesse v_0
K_0 = somme des coefficients de perte de charge des singularités à la vitesse v_0
? = masse volumique du fluide dans les conditions réelles de température et de pression de l'écoulement, en $kg.m^{-3}$
v_0, et v_1, etc. = vitesses du fluide dans les conditions réelles d'écoulement, en $m.s^{-1}$
? = coefficient donné par l'abaque universel (voir figure 247) en fonction du nombre de Reynolds

$Re = \frac{v_o\, D_h}{\nu}$ (ν = viscosité cinématique du fluide en $m^2.s^{-1}$ dans les conditions d'écoulement
- voir § 3.2.3, 3.3.3, 4.1.2 et en fonction de la rugosité relative

$\frac{k}{D_h}$ (k = coefficient de rugosité de la paroi, en m, donné .§ 4.1.2)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

D_h = diamètre hydraulique de la conduite (ou du canal) en mètre $D_h = \frac{4\,S}{p_m}$ où S est la section de conduite (ou canal) occupée par le fluide, en m^2, et p_m le "périmètre mouillé" par le fluide dans cette section, en m. D_h est le quadruple du rayon hydraulique ou rayon moyen usuel. En conduite circulaire de diamètre D, D_h = D. Le calcul se conduit pour les pertes de charge par frottement comme indiqué § 4.1.2 (tuyauteries) et § 4.5 (canaux), et pour les pertes de charge singulières §4.2 et §4.5 Il est souvent d'usage de donner les valeurs des pertes de charge en mètres de CE (de masse volumique de l'eau1000 $kg.m^{-3}$ à 4 °C). Les formules précédentes deviennent alors

- en écoulement turbulent

$$\Delta h_0 = \frac{\varrho}{1000}\frac{\lambda}{D_h}\frac{v_0^2}{2\,g}L_0 + \frac{\varrho}{1000}K_0\frac{v_0^2}{2\,g} = \frac{\varrho}{1000}\left(\frac{\lambda}{D_h}L_0 + K_0\right)\frac{v_0^2}{2\,g}$$

- en écoulement laminaire

$$\Delta h_0 = \frac{\varrho}{1000}\left(\frac{64}{Re\,D_h}L_0 + K_0\right)\frac{v_0^2}{2\,g},$$

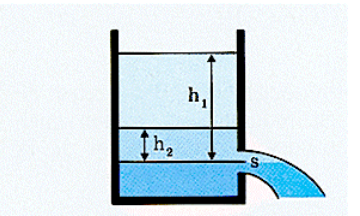
où K_o a des valeurs particulières à calcu1er à l'aide d'ouvrages spécialisés.

4.8
RENSEIGNEMENTS DIVERS

- **Temps de vidange d'un bac à section horizontale constante percé à sa base d'un orifice**

La durée de la vidange en secondes est

$$t = \frac{2\,S\,(\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})}{ks\sqrt{2g}}$$

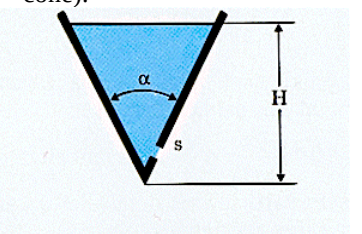


S = surface du bac en cm^2.
s = surface de l'orifice en cm^2.
k = coefficient de contraction de l'orifice (voir § 4.4).
g = accélération de la pesanteur: 981 $cm.s^{-2}$.
h_1 = hauteur initiale d'eau au-dessus de l'orifice en cm.
h_2 = hauteur finale d'eau au-dessus de l'orifice en cm.
(h_2 = 0 pour une vidange totale).

- **Temps de vidange d'un bac conique**

$$t = \frac{2\pi}{5}\cdot\frac{tg^2\frac{\alpha}{2}}{ks\sqrt{2g}}\cdot(H)^{5/2}$$

(en supposant que l'orifice est à la base du cône).



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Pompes**

La puissance à fournir, en kW, est

$$P = \frac{Q(H + h)}{r \times 366} \text{ pour de l'eau.}$$

Q = débit à fournir, en $m^3.h^{-1}$
H = hauteur totale d'élévation statique (mètres de CE).
h = perte de charge dans les tuyaux (mètres de CE).
r =Rendement de la pompe (de 0,6 à 0,9).
En principe, on doit avoir

$$h < \frac{H}{10}.$$

Lorsque la vitesse de rotation N devient N' = kN, les caractéristiques des pompes centrifuges suivent les relations:

$Q' = kQ$; $H' = k^2H$; $P'=k^3P$
Le rendement est pratiquement indépendant des vitesses de rotation.

- **Moteurs hydrauliques**

La puissance fournie, en kW, est

$$P = \frac{QHr}{366}.$$

Q = débit en $m^3.h^{-1}$.
H = hauteur de la chute d'eau en mètres.
r = rendement de la turbine.

	Valeurs de r
Roue hydraulique	0,70 à 0,75
Turbine hélice et turbine Francis	0,70 à 0,88
Turbines Kaplan et Pelton	0,70 à 0,92

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. ÉLECTRICITÉ

5.1. UNITÉS, SYMBOLES

I	Intensité	Ampère	(A)
u	Tension d'un courant continu ou d'un courant alternatif monophasé (tension simple)	Volt	(V)
U	Tension composée d'un courant alternatif triphasé (entre deux phases)	Volt	(V)
P	Puissance active	Watt	(W)
Pa	Puissance apparente	Volt-Ampère	(VA)
R	Résistance	Ohm	(Ω)
X	Réactance	Ohm	(Ω)
Z	Impédance	Ohm	(Ω)
cos Ø	Facteur de puissance (ou tg Ø)		
?	Rendement		
C	Capacité		
L	Inductance		

5.2. DÉFINITIONS ET FORMULES USUELLES

- **Intensité**

Courant continu

$$I = \frac{P}{u}$$

Courant alternatif monophasé

$$I = \frac{P}{u \cos \varnothing}$$

Courant alternatif triphasé

$$I = \frac{P}{U \sqrt{3} \cos \varnothing}$$

- **Résistance**

$$R = r \frac{l}{s} 10^{-2}$$

r = résistivité en microhm-cm,
1= longueur en m
s = section en mm^2.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Facteur de puissance ou cos Ø**

L'intensité et la tension d'un courant alternatif sont rarement en phase. Le cosinus de l'angle des deux vecteurs intensité tension est appelé facteur de puissance.

La self-induction décale en arrière l'intensité sur la tension; la capacité la décale en avant.

Dans les deux cas la puissance active est diminuée.

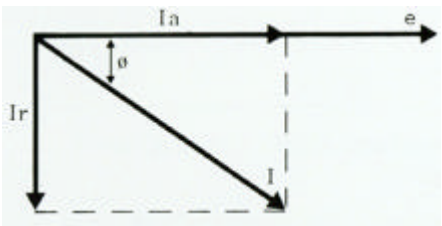


Figure 250. Cas d'un circuit comportant une self-induction.

Pour le courant industriel de forme sinusoïdale (cas général)

I_a = I cos Ø est le courant actif ou watté,

I_r = I sin Ø est le courant réactif ou déwatté.

- **Puissance apparente, active, réactive**

I étant l'intensité lue sur l'ampèremètre, U la tension du réseau entre phases, en triphasé,

u la tension du réseau entre phase et neutre, en monophasé, les puissances sont données dans le tableau suivant

	Monophasé	Triphasé
Puissance apparente	uI	UI v3
Puissance active	uI cos Ø	UI v3cos Ø
Puissance réactive	uI sin Ø	UI v3 sin Ø

La puissance apparente s'exprime en volt-ampères (VA)

La puissance active s'exprime en Watts (W)

La puissance réactive s'exprime en volt-ampères réactifs (VAr)

Un mauvais cos Ø est préjudiciable aussi bien à l'utilisateur qu'au distributeur d'énergie. Il impose de fortes sections pour les canalisations et des puissances apparentes plus grandes pour les alternateurs et les transformateurs.

- **Impédance d'un circuit**

C'est la résultante de la résistance ohmique et de la réactance du circuit.

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$,

R = résistance,

X = réactance (inductive, capacitive).

- **Quantité de chaleur dégagée par un circuit** de résistance R traversé par un courant I pendant une seconde

$W\ (Joule) = P \times t = RI^2$

- **Montage étoile. Montage triangle**

Des résistances, des enroulements de moteur, peuvent être banchés en étoile ou en triangle. La figure 251 rappelle les caractéristiques de ces montages.

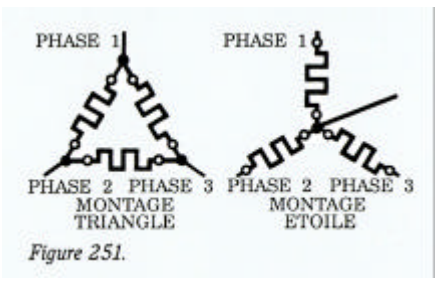


Figure 251.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.3. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

5.3.1. Installations générales

. **Détermination du cos Ø moyen d'une installation**

Soit Q_a la consommation d'énergie active relevée sur le compteur actif pour une période de temps donnée et Q_r la consommation d'énergie réactive relevée sur le compteur réactif pour la même période, le cos Ø moyen de l'installation, pendant cette période, est donné par la formule :

$$\cos \phi = \frac{Q_a}{\sqrt{Q_a^2 + Q_r^2}}$$

- **Amélioration du cos Ø**

Les pertes en ligne par effet joule étant proportionnelles à I^2, alors que l'énergie active consommée n'est proportionnelle qu'à I cos Ø, les secteurs de distribution pénalisent les utilisateurs dont les installations présentent un facteur de puissance inférieur à une certaine valeur (de l'ordre de cos Ø = 0,93 correspondant à tg Ø = 0,4 sur le réseau français).

Lorsque la diminution du cos Ø est due à une réaction selfique de l'installation, on l'améliore par une batterie de condensateurs. La puissance de la batterie de condensateurs, exprimée en kilovar, nécessaire pour amener le cos Ø à la valeur désirée, ne peut être calculée avec exactitude qu'après 4 à 6 mois d'exploitation de la station de traitement d'eau.

On peut toutefois, pour compenser en phase transitoire un mauvais facteur de puissance, mettre en place une batterie de condensateurs dont la valeur est estimée à 10% environ de la puissance totale installée sur la station.

- **Éclairage et chauffage**

Le nombre, la disposition et la puissance des appareils d'éclairage sont calculés en général pour obtenir, sauf cas particulier, les niveaux d'éclairement suivants:

Éclairage intérieur des locaux	
Bureau, salle de commande, salle de réunion, Laboratoire	300 lux
Postes de travail, emplacements de commande	200 lux
Circulations intérieures	100 lux
Autres zones	40 lux
Éclairage extérieur	
Aire de travail, abords de bâtiments, endroits dangereux	50 lux
Accès à l'installation, voiries,	10 lux

Les niveaux d'éclairement précédemment décrits sont des valeurs minimales admissibles.

- **Chauffage intérieur des locaux**

Le calcul de la puissance nécessaire pour le chauffage d'un local tient compte de nombreux facteurs : volume de la pièce, orientation, isolation thermique, température minimale extérieure, etc.

On peut toutefois considérer, en tenant compte de l'écart de température minimum extérieur et le maximum désiré dans le local, que la puissance à installer sera de l'ordre de 2 à 3 watts par °C (écart) et par m^3.

5.3.2. Moteurs

Les moteurs couramment utilisés sont des **moteurs asynchrones**; les renseignements donnés ci-après ne concernent que ce type de moteur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Puissance nominale. Puissance absorbée**

La puissance **nominale** est celle indiquée au catalogue ou sur la plaque du moteur. Elle correspond à la **puissance mécanique** développée sur l'arbre moteur et s'exprime en kW.

La puissance électrique **absorbée** est donnée par la relation

$$P_{absorbée} = \frac{\text{puissance mécanique fournie}}{\text{rendement}}$$

Elle s'exprime également en kW et c'est elle qui est à retenir pour établir le bilan de puissance d'une installation.

Un moteur doit être utilisé pour la fréquence prévue par le constructeur. Un moteur calculé pour être alimenté en 50 Hz aura un couple plus faible s'il est alimenté en 60 Hz.

- **Rendement**

Pour les moteurs de fabrication courante, le rendement ? est d'autant plus élevé que la puissance du moteur est plus grande.

Exemple: moteur de 50 kW ? = 0,85
moteur de 1 kW ? = 0,70.

Pour un moteur déterminé, le rendement indiqué par le constructeur correspond à l'utilisation à pleine charge; il diminue légèrement avec la charge.

Exemple moteur de 50 kW
? = 0,85 à 4/4 charge,
? = 0,82 à 3/4 charge,
? = 0,80 à 1/2 charge.

- **Détermination de la puissance d'un moteur**

Pour déterminer la puissance nominale d'un moteur il est recommandé de prendre, par rapport à la puissance mécanique absorbée par l'appareil entraîné, les marges suivantes (sauf cas particuliers, tels que broyeurs, dilacérateurs)

- 10 à 15 % dans le cas d'accouplement direct,
- 20 % dans le cas de transmission par courroie.

- **Tension d'alimentation**

- La puissance variant sensiblement comme le carré de la tension, il est indispensable de prévoir le moteur pour la tension exacte du réseau.

Par exemple, un moteur fournissant sur l'arbre 15 kW sous une tension de 380 V, ne fournira que 12,5 kW environ sous une tension de 350 V.

- La plupart des constructeurs prévoient des boîtes à six bornes permettant le couplage étoile et le couplage triangle, par déplacement de barrettes: le premier sera utilisé par exemple sous 380 V triphasé, le deuxième sous 220 V triphasé.

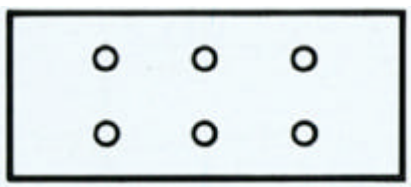


Figure 252. Boîte à six bornes.

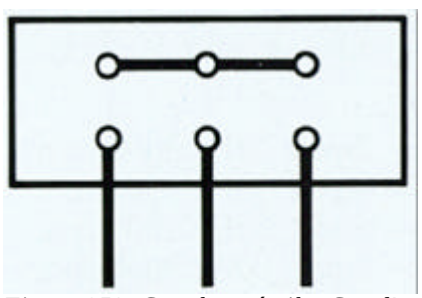


Figure 253. Couplage étoile. Cas d'un moteur 220/380 alimenté en 380 V.

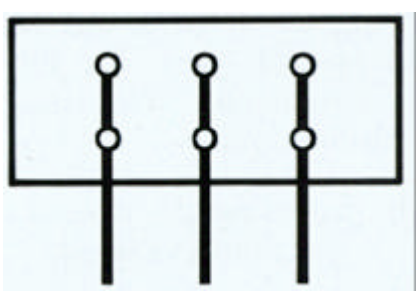


Figure 254. Couplage triangle. Cas d'un moteur 220/380 alimenté en 220 V.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Si le moteur doit être démarré en étoiletriangle, il est nécessaire que les six bornes soient sorties et prévues pour les tensions suivantes

Tension réseau	Tension moteur
220 V	220/380 V
380 V	380/660 V
440 V	440/762 V

Pour ce mode de démarrage, aucune barrette ne doit être placée dans la boîte â bornes.

- **Vitesse des moteurs asynchrones A vide:** les moteur asynchrones monophasés ou triphasés ont une vitesse à vide pratiquement égale au synchronisme donnée par la formule

$$N = \frac{60 \times F}{n}$$

N = nombre de tours par minute (t/min),
F = fréquence en périodes par seconde
n = nombre de paires de pôles. Exemple

moteur	2 pôles	50 Hz	3 000 t/min
	4 pôles	50 Hz	1500 t/min
	6 pôles	50 Hz	1000 t/min
	2 pôles	60 Hz	3 600 t/min
	4 pôles	60 Hz	1800 t/min
	6 pôles	60 Hz	1200 t/min

En charge: la vitesse est légèrement inférieure à la vitesse à vide. La différence correspond au glissement qui s'exprime par la relation

$$g = \frac{\text{vitesse de synchronisme} - \text{vitesse en charge}}{\text{vitesse de synchronisme}}$$

g est compris entre 2 et 8 % de la vitesse de synchronisme

- **Choix du moteur et du mode de démarrage**

Ces deux questions dépendent de l'appareil entraîné et des impératifs imposés par le secteur.

En ce qui concerne l'appareil entraîné, quel que soit le mode de démarrage, il est nécessaire que le couple accélérateur (différence entre le couple moteur et le couple résistant) soit suffisant pour permettre la mise en vitesse du groupe. Deux facteurs principaux interviennent

- le moment de giration appelé Gd', exprimé en newtons par mètre carré,
- le couple nécessaire au démarrage de la machine.

Certaines machines démarrent pratiquement à vide, les ventilateurs par exemple, mais la masse et le diamètre des parties en rotation (éléments caractérisant le Gd') sont tels que leur mise en vitesse demande une énergie relativement importante, transformée presque uniquement en énergie cinétique.

Pour d'autres machines (pompes dilacératrices, compresseurs), dès sa mise sous tension, le moteur doit permettre à celles-ci d'effectuer un travail mécanique, tout en accélérant leur vitesse; c'est donc le couple nécessaire au démarrage qui est à prendre en considération.

Le démarrage "en direct" est normalement recommandé :

- mise en vitesse plus rapide,
- échauffement global réduit.

Il est possible, si:

- la capacité du réseau est suffisante,
- le couple de démarrage est supporté mécaniquement par la machine entraînée.

Dans le cas d'un circuit de secours, la puissance disponible est limitée et dans la plupart des cas on est conduit à utiliser des modes de démarrage progressifs.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le tableau ci-après donne les caractéristiques des différents procédés de démarrage. Courant continu

Mode de démarrage	Couple au démarrage	Appel de courant
Direct	Cd	Id
Étoile triangle	0,3 Cd	0,3 Id
Résistances statoriques	kCd	vkId
Autotransformateur	kCd	kId

K est le coefficient choisi du couple de démarrage.

Les rapports des appels de courant et des couples au démarrage, aux valeurs nominales, sont donnés dans le tableau suivant (valeurs approchées)

Type de moteur	Id / in	Cd / Cn
Rotor court-circuit (démarrage direct)	6	1,6
Rotor court-circuit (démarrage étoile-triangle)	2	0,6
Rotor bobiné à bagues	1,33	0,8 à 2

Id = intensité au démarrage,
In = intensité nominale à pleine charge,
Cd = couple au démarrage,
Cn = couple nominal,
Cn s'exprime en newton-mètres. Si N est la vitesse en tours/minute, P la puissance nominale en kilowatts

$$Cn = \frac{9\,564\ P}{N}$$

(l'ancienne unité était le mètre kilogramme force, 1 kgf = 9,81 N.

- **Intensité absorbée**

Courant continu : $$I = \frac{Pn\ 10^3}{u\ \rho}$$

Courant monophasé: $$I = \frac{Pn\ 10^3}{u\ \rho \cos \varnothing}$$

Courant triphasé : $$I = \frac{Pn\ 10^3}{U\ \sqrt{3}\ \rho \cos \varnothing}$$

Pn est la puissance nominale du moteur exprimée en kilowatt.

- **Valeurs approximatives de l'intensité absorbée** (cas de moteur de puissance de 1 à 10kW)

	1500t/mm	3000t/mm
Monophasé 220V	5.5 A par kW	5 A par kW
Triphasé 220V	4.3 A par kW	3.8 A par kW
Triphasé 380V	2.5 A par kW	2.2 A par kW

Pour une puissance donnée, le cos Ø et le rendement diminuant lorsque le nombre de pôles augmente, l'intensité absorbée sera d'autant plus élevée, pour une puissance donnée, que la vitesse nominale est plus faible.

Ainsi, un moteur de 750 t/mn absorbera environ 20% de plus qu'un moteur de même puissance à 3 000 t/mn et 10% de plus qu'un moteur de même puissance à 1500 t/mn.

- **Câbles d'alimentation**

La chute de tension admissible aux bornes d'un moteur à pleine charge étant de 5 %, la section des câbles d'alimentation doit être calculée en conséquence, en tenant compte notamment de l'intensité absorbée à pleine charge et de la longueur du câble.

Le tableau ci-après donne, à titre indicatif, les caractéristiques du câble d'alimen-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tation pour une tension triphasée de 380 V, une longueur maximale de 25 m ainsi que le diamètre du presse-étoupe devant équiper la boite à bornes.

Puissance du moteur	Nombre et section des conducteurs cuivre	Persse-étoupe Ø mm
jusque 8 kW	4 X 2,5 mm^2	13
de 8 à 14kW	4 X 4 mm^2	16
de 14 à 18kW	4 X 6 mm^2	16
de 18 à 25kW	4 X 10mm^2	21

On admet que le quatrième conducteur sert à la mise à la terre du moteur, qui se fait généralement à l'intérieur de la boite à bornes. L'utilisation d'un boulon de scellement pour mettre le moteur à la terre est à proscrire.

Ne pas oublier que dans le cas d'un démarrage étoile-triangle deux câbles sont à prévoir, la section des conducteurs pouvant être la même. Un des deux câbles comportera le quatrième conducteur pour mise à la terre du moteur.

- **Chute de tension admissible dans les canalisations**

La norme NF C 15.100 fixe la valeur de la chute de tension égale à un pourcentage de la tension du réseau

- 3 % pour les canalisations d'éclairage,
- 5 % pour les canalisations de force motrice.

Au démarrage des moteurs, on admet généralement, pour les canalisations de force motrice, une chute de tension de 10%.

5.3.3 Abonnement

L'établissement d'un contrat de fourniture d'énergie doit être défini en fonction des puissances absorbées simultanément sur le réseau de distribution et optimisé suivant les différents postes horaires proposés par le fournisseur d'énergie.

Lors de la détermination du bilan d'exploitation d'une station de traitement, il est donc nécessaire de tenir compte de ces postes horaires avec leurs variations de tarification.

On trouve ci-après **en exemple, un extrait d'un fascicule E.D.F.** concernant le tarif général pour une utilisation moyenne, soit moins de 10 000 kW en distribution moyenne tension de 5 à 30 kV (tarif dit vert E.D.F.). Les différents tarifs sont paramétrés pour une généralisation du raisonnement.

Postes horaires

Heures creuses	22 h à 6h
Heures pleines	6 h à 9h
	11h à 18h
	20h à 22h
Heures de pointe	9h à 11h
	18h à 20h

Il faut considérer également **deux périodes**

- la période d'été comprise entre avril et octobre (7 mois). Pendant cette période, il n'y a pas d'heure de pointe.

Valeur du kWh (estimation août 1988)
heures pleines = a centimes par kWh heures
creuses = a x 0,56 centimes kW

- la période d'hiver comprise entre novembre et mars (5 mois). Pendant cette période les heures de pointe se situent

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

(deux fois deux heures) de décembre à février (3 mois).

heures creuses a x 1,48 centimes par kWh (le dimanche, heures creuses toute la, journée)

heures pleines a x 3,18 centimes par kWh

heures de pointe a x 6,16 centimes par kWh

La prime fixe annuelle dans le cas du tarif utilisation moyenne est de a X 2 000 centimes par kW (nombre de kW souscrits au contrat).

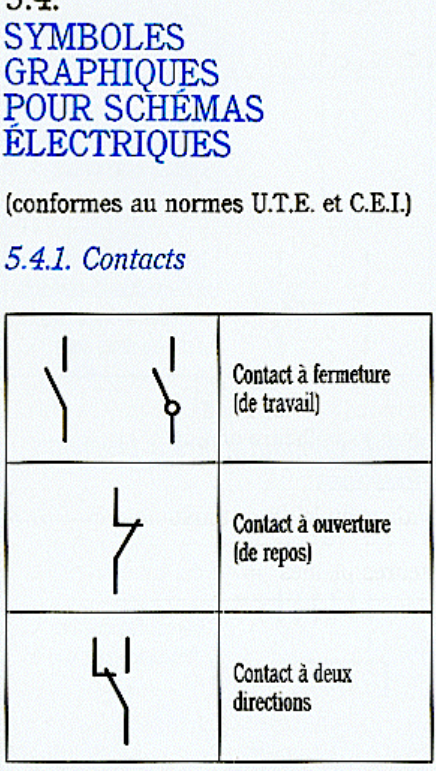
Bien d'autres contrats et valeurs du kWh peuvent être déterminés et négociés avec le distributeur d'énergie en fonction de l'importance des puissances souscrites.

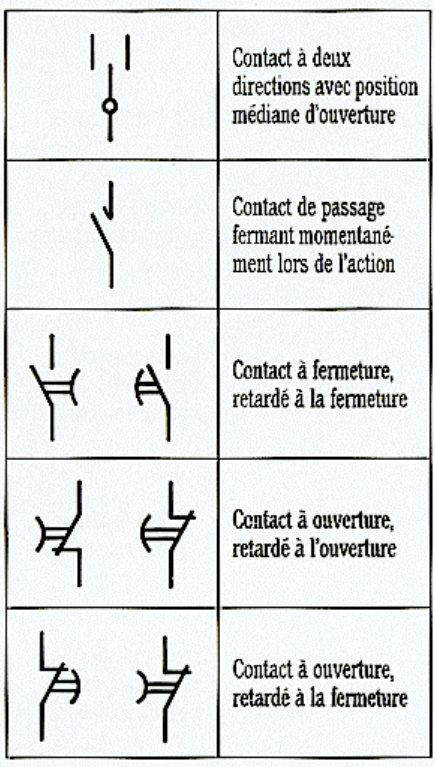
Il ressort simplement de ce qui précède tout l'intérêt de concevoir des installations dont les unités à forte consommation d'énergie puissent être arrêtées ou ralenties durant les postes horaires à prix de kW élevé. Pareillement, dans le cas de production autonome d'énergie électrique (biogaz), celle-ci peut être réservée préférentiellement à ces mêmes postes horaires.

5.4. SYMBOLES GRAPHIQUES POUR SCHÉMAS ÉLECTRIQUES

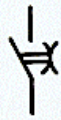
(conformes au normes U.T.E. et C.E.I.)

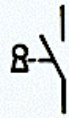
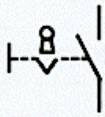
5.4.1. Contacts



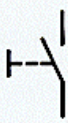
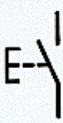
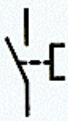
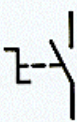


Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

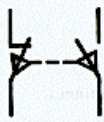
	Contact à fermeture, retardé à la fermeture et à l'ouverture
	Contact à fermeture, à retour automatique
	Contact à fermeture, à position maintenue

	Auxiliaire manuel de commande actionné par clé
	Auxiliaire manuel de commande condamné par clé dans la position d'accrochage

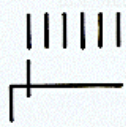
5.4.2. Commutateurs unipolaires

	Contact à fermeture, à commande manuelle, symbole général
	Bouton-poussoir à fermeture, à retour automatique
	Tirette à fermeture, à retour automatique
	Bouton rotatif à fermeture, sans retour automatique

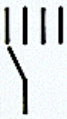
5.4.3. Interrupteurs de position

	Interrupteur de position, contact à fermeture
	Interrupteur de position, contact à ouverture
	Interrupteur de position, à deux circuits distincts, actionné mécaniquement dans les deux sens

5.4.4. Commutateurs à plusieurs directions

	Commutateurs à n directions pour n = 6

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

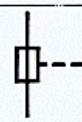
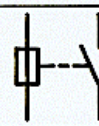
	Commutateur à n directions, variante de représentation pour n = 4
	Commutateur à quatre directions avec diagramme de position

	Disjoncteur
	Sectionneur

5.4.5. Appareils mécaniques de connexion

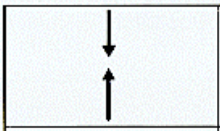
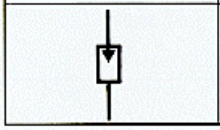
	Interrupteur
	Contacteur
	Discontacteur
	Rupteur

5.4.6. Fusibles et interrupteurs à fusibles

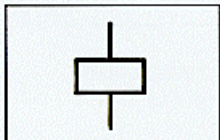
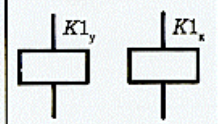
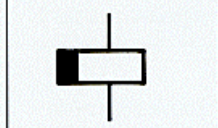
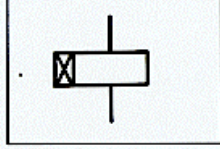
	Fusible, symbole général
	Fusible avec indication
	Fusible à percuteur
	Fusible à percuteur avec circuit de signalisation distinct
	Fusible interrupteur
	Fusible sectionneur

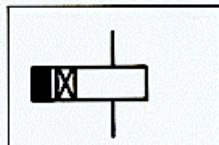
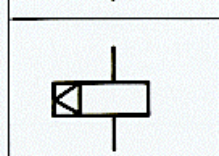
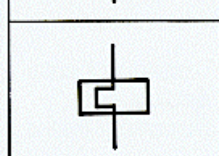
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.4.7. Éclateurs de parafoudre

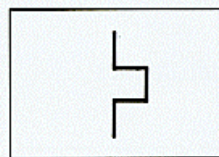
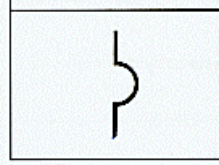
	Éclateur
	Parafoudre

5.4.8. Organes de commande
Relais électromagnétiques

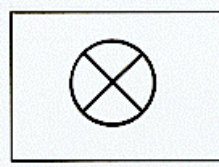
	Organe de commande d'un relais, symbole général
	Organe de commande à deux enroulements séparés
	Contact bidirectionnel d'un relais bistable
	Organe de commande d'un relais à mise au repos retardé
	Organe de commande d'un relais à mise au travail retardé

	Organe de commande d'un relais à mise au travail et mise au repos retardées
	Organe de commande d'un relais à verrouillage mécanique
	Organe de commande d'un relais thermique

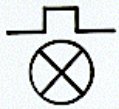
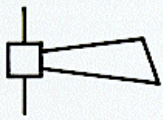
Moyen de détection d'un effet de surintensité

	Effet thermique
	Effet électromagnétique

5.4.9. Appareils de signalisation
(lumineux et sonores)

	Lampe de signalisation

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

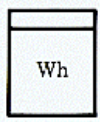
	Voyant lumineux Clignotant
	Avertisseur sonore (klaxon)
	Sonnerie

5.4.10. Transformateurs de mesure

	Transformateur de courant à un enroulement primaire et un enroulement secondaire
	Transformateur de tension

5.4.11. Symboles divers

	Voltmètre

	Ampèremètre
	Wattmètre
	Indicateur de facteur de puissance
	Ohmètre
	Compteur horaire
	Compteur d'énergie active (Wattheuremètre)
	Compteur d'énergie réactive (Varheuremètre)
	Horloge

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.4.12 Normalisations électriques

Les équipements électriques français sont définis par les règles de l'U.T.E. (Union Technique de l'Electricité). Ces règles sont classées par article dont les principaux utilisés dans les installations de traitement d'eau sont

C12.100, C13.100, C15.100

Les autres normalisations habituellement rencontrées sont :

- I.E.C. (International Electrotechnical Commission) ou C.E.I. (Commission Électrotechnique Internationale).
- V.D.E. (Verband Deutscher Electro-techniker Germany).
- B.S. (British Standards).
- C.E.I. (Comitato Elettrotecnico Italiano).
-N-E.M.A. (National Electrical Manufacturers Association).
- A.N.S.I. (American National Standards Institute).

5.5. VALEURS NUMÉRIQUES DIVERSES

- **Résistivité des principaux métaux et alliages conducteurs**

Résistivité à t °C

$r_t = r°(1 + at)$,

r_o = résistivité à 0 °C,

a = coefficient de température,

t = température en degré Celsius.

- **Tension d'un accumulateur au plomb**

2 volts par élément.

- **Isolement minimal d'un moteur basse tension par volt de service**.

1000O.

Nature du conducteur	Résistance microhms.cm (résistivité) à °C	Coefficient de température
Cuivre électrolytique	1,593	0,00388
Cuivre recuit	1,538	0,0045
Aluminium	2,9	0,0039
Argent	1,505	0,0039
Fer pur	9,065	0,00625
Fil de fer	13,9	0,00426
Fil d'acier	15,8	0,0039
Bronze siliceux téléphonique	3,84	0,0023
Ferro-nickel	78,3	0,00093
Maillechort	30	0,00036
Constantan	50	0
Mercure	95	0,00099
Zinc	6	0,0037

5.6. SÉCURITÉ DES PERSONNES

Il est admis que les tensions considérées comme non dangereuses sont au maximum:

- 50 V pour le courant continu,
- 24 V pour le courant monophasé,
- 42 V pour le courant triphasé avec neutre à la terre.

La limite d'intensité supportable sans danger est de l'ordre de 25 mA en courant alternatif et 50 mA en courant continu.

Si l'on considère que la résistance du corps se situe entre 2 000 et 1000 ohms.

$$I = \frac{U}{1000} = 0{,}05 \text{ A}$$

d'où $U = 50$ V en D.C.
et $U = 25$ V en A.C.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. INSTRUMENTATION

L'instrumentation est représentée sur les schémas de procédé généralement appelés
- P & I Piping and Instrumentation, ou
-PID Piping Instrumentation Diagram.

Les instruments ou leurs fonctions sont désignés à l'aide de symboles généraux définis à la figure 255 qui contiennent l'identification fonctionnelle dans leur partie supérieure.

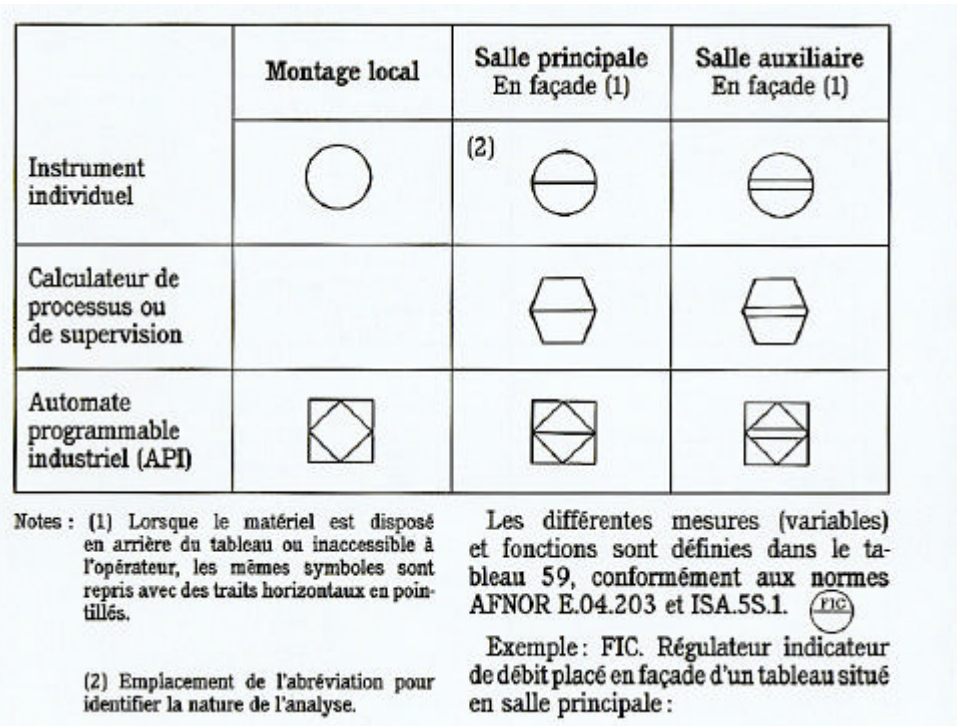


Figure 255.Symbôles généraux en instrumentation

6.1. PRINCIPE DE CODIFICATION

L'identification fonctionnelle est constituée de deux à quatre caractères en lettres majuscules, comprenant deux parties :
- 1re partie: Première Lettre ou Variable et son modificateur, qui est commune à tous les instruments d'une même boucle.
- 2e partie: Lettres Suivantes qui désignent les fonctions (voir tableau 59).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 59. Tableau d'identification des éléments servant à coder une fonction ou un équipement.

	Première	lettre	Lettres suivantes		
	Variable mesurée ou initiale	Modificateur	Fonction passive ou d'information	Fonction de sortie	Qualificatif
A	Anal se		Alarme		
B	Combustion		Au choix	Au choix	Au choix
C	Conductivité			Ré lation	
D	Masse volumique Concentration Turbidité	Différentiel		Défaut	
E	Tension électrique		Élément rimaire		
F	Débit	Rapport -Fraction			
G	Au choix		Glace-Visuel		
H	Commande manuelle				Haut (Très haut -HH)
I	Intensité de courant		Indication		
J	Puissance	Scrutation			
K	Temps	Temporisation		Sélection Auto-Manu	
L	Niveau		Lampe témoin		Bas (Très bas -LL)
M	Humidité				Moyen Intermédiaire
N	Viscosité Au choix		Alimentation capteurs*	Au choix	Au choix
0	Au choix		Orifice calibré		
P	Presssion Vide		Point d'essai Point d'échantillon		
Q	Quantité	Intégration Totalisation	Intégration Totalisation		
R	Rayonnement		Enregistreur Imprimante		
S	Vitesse Fréquence	Sécurité		Contact Commutation	
T	Température			Transmetteur	
U	Variable multiple		Multifonction	Multifonction	Multifonction
V	Vibration			Dispositif réglant Électrovanne Vanne de ré	
W	Masse Force couple		Gaine		
X	Au choix	Compensation de température*	Isolement galvanique*	Au choix	Au choix
Y	Événement			Relais	
Z	Position Longueur			Actionneur	

Nota: Au choix: Emploi laissé au choix de l'utilisateur.

* : Hors normes AFNOR et ISA.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.2. COMBINAISONS DE LETTRES

Le tableau 60 présente les identifications fonctionnelles les plus courantes.

On peut citer quelques combinaisons qui peuvent être utilisées à contre sens
FE = élément primaire de mesure de débit. Ex. diaphragme, venturi...
FO = orifice calibré de limitation de débit.
PCV = régulateur autonome de pression. Ex. détendeur.
PSV = dispositif de sécurité autonome sur une pression. Ex. soupape de sécurité.
PC = régulateur de pression.
PV = vanne de régulation de pression.

On peut trouver aussi d'autres notations placées dans des conditions différentes de celles définies à la figure 2 5 5 et qui ne répondent pas à la codification des tableaux 59 et 60. Par exemple, placées sous le symbole du dispositif réglant :
FC = fermé par défaut (failure closed).
FO = ouvert par défaut (failure open).
FL = maintenu en cas de défaut (failure locked).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 60. Exemples des combinaisons de lettres définissant une fonction ou un équipement

Premières lettres			Lettres suivantes										
Variable mesurée			Élém. prim.	Fonctions						Dispositif réglant			Signalisation	
Initiale	Signification	Modificateur	Capteur	I Indicateur	T Trans-metteur	R Enregistreur ou imprimante	C Régulateur	S Contacts	Y Relais divers et de calcul	Vanne, ventelle	Commande action et autre	Auto-nome	L Lampe témoin	A Alarme
	Associations courantes des lettres suivantes	–D,–F – J – Q – S	–E,–P –O,–W	– I – IS – G	– T –IT	– R – RS	– C – IC – RC	H (H) – S M – IS L (L)	– Y	– V	– Z	– CV – SV	H (H) – L M L (L)	H (H) – A M L (L)
A	Analyse		AE AP	AI AIS	AT, AIT	AR	AC, AIC, ARC	ASH, . .	AY	AV	AZ		ALH, .	AAH, .
B	Combustion (Détection flamme)		BE		BT			BSL,. . .			BZ		BLH BLL	BALL,
C	Conductivité		CE	CI CIS	CIT CT	CR	CC, CIC, CRC	CSH,. . .	CY	CV	CZ		CLH, . CLL,. .	CAH, .
D	Masse volumique Concentration Turbidité		DE DP	DI	DT, DIT	DR	DC, DIC, DRC	DSH, . .	DY	DV	DZ		DLH, .	DAH, .
E	Tension électrique			EI	ET, EIT	ER	EC, EIC, ERC	ESH, ESL	EY	EV	EZ		ELLL, . ELH,	EAH, . EALL,
F	Débit Fraction de débit Débit totalisé	FF FQ	FE,FO FQ	FI,FIS FFI FQI FG	FT, FIT FFT	FR FFR FQR	FC, FIC, FRC FFC,FFIC,FFRC	FSH,. . . FFSH,. .	FY FFY	FV FFV	FZ FFZ	FCV	FLH, . FFLH,.	FAH, . FFAH,
G	Au choix de l'usager													
H	Commande manuelle						HC, HIC	HSH, . .		HV	HZ	HCV		
I	Courant		IE	II IIS	IT	IR IRS	IC, IRC, IIC	ISH, . . . ISHH, . .	IY		IZ			IAH, . IAHH,
J	Puissance		JE	JI JIS		JR JRS	JC, JIC, JRC	JSHH, . .						
K	Temps	KQ		KI		KR		KQS						
L	Niveau		LE	LI,LIS LG	LT,LIT	LR	LC, LIC, LRC	LSH,LSL,	LY	LV	LZ	LCV	LLH, .	LAH, .
M	Humidité		ME	MI	MT, MIT	MR	MC, MIC, MRC	MSL MSHH, .	MY	MV	MZ	MCV MSV	MLH, .	MAH,.

NOTA: Toutes les combinaisons ne sont pas mentionnées, seules les principales y figurent.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

suite du tableau 60

Premières lettres			Lettres suivantes										
Variable mesurée			Élém. prim.	Fonctions						Dispositif réglant			Signalisation	
Initiale	Signification	Modificateur	Capteur	I Indicateur	T Trans-metteur	R Enregistreur ou imprimante	C Régulateur	S Contacts	Y Relais divers et de calcul	Vanne, vanne	Commande action et autre	Auto-nome	L Lampe témoin	A Alarme
	Associations courantes des lettres suivantes	–D,–F – J – Q – S	–E,–P –O,–W	– I – IS – G	– T –IT	– R – RS	– C – IC – RC	H (H) – S M – IS L (L)	– Y	– V	– Z	– CV – SV	H (H) – L M L (L)	H (H) – A M L (L)
N	Viscosité		NE	NI	NT, NIT	NR	NC, NIC, NRC	NSLL, NHSS,...	NY	NV	NZ		NLHH,.	NALL,
O	Au choix de l'usager													
P	Pression abs/relatif différent	PD PS	PP PSE	PI, PIS PDI	PT, PIT PDT	PR PDR	PC, PIC, PRC PDC, PDIC,	PSH, PDSH,	PY PDY	PV PDV	PZ PDZ PSZ	PCV PDCV PSV	PLH, PDLH,	PAH, PDAH,
Q	Quantité Comptage		QE	QI QIS	QT QIT	QR QRS		QSH/HH QSL/LL,.	QY	QV	QZ		QLL,. .	QAL, .
R	Rayonnement		RE	RI RIS	RT	RR							RLH, .	RAH, .
S	Vitesse		SE	SI SIS	ST SIT	SR	SC, SIC, SRC	SSH/HH, SSL/LL,.	SY		SZ		SLH, .	SAL, . SAH, .
T	Température	TD TJ TS	TE TDE TW TSE	TI, TIS TDI	TT, TIT TDT,TDIT	TR TDR	TC, TIC, TRC TDC, TDIC, TDRC	TSH, . . TDSH,. .	TY TDY	TV TDV	TZ TDZ	TCV TSV	TLH, . TDLH,.	TAH, . TDAH,
U	Variable multiple			UI		UR								
V	Grandeurs mécaniques (Vibrations...)		VE	VI VIS	VT VIT	VR VRS		VSH, . . VSHH,. .	VY		VZ		VLH, . VLHH,.	VAH, . VAHH,
W	Masse ou Force Couple	WD WQ	WE	WI WQI	WT, WIT	WR	WC,WIC, WRC	WSH, . .	WY	WV	WZ		WLH, .	WAH,.
X	Au choix de l'usager													
Y	Événement							YSH, . .					YL YLH, .	YA YAH, .
Z	Position longueur		ZE	ZI	ZT,ZIT			ZSH,ZSL,					ZLH,. .	ZAH, .

NOTA: toutes les combinaisons ne sont pas mentionnées, seules les principales y figurent

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7. CHALEUR

7.1. NOTIONS DE PHYSIQUE DES GAZ ET DE THERMODYNAMIQUE

7.1.1. Gaz parfaits

A. Loi des gaz parfaits

$$pV_m = RT$$

p = pression du gaz en pascal
V_m = volume molaire en m^3
T = température absolue en K
R =constante molaire des gaz parfaits: 8,314 J/(mol.K).

B. Loi de Gay-Lussac

$$\frac{m\,(1 + \alpha t)}{p} = \frac{m_1\,(1 + \alpha t_1)}{p_1}$$

m, m_1 = masses volumiques d'un gaz aux pression p, p1 et aux températures t et t_1 en °C.

$$\alpha = \frac{1}{273} = 0{,}00367$$

C. Loi d'Avogadro-Ampère

$$M = 29d$$

relation qui lie la masse molaire M d'un gaz en $g.mol^{-1}$ à sa densité d par rapport à l'air dans les conditions normales de pression et de température.

D. Chaleur massique

La chaleur massique est par définition le quotient de la capacité thermique par la masse, la capacité thermique étant le rapport

$$\frac{dQ}{dT}$$

de la quantité de chaleur dQ fournie à un système provoquant une augmentation de température dT. Pour un gaz, on distingue la chaleur spécifique à pression constante c_p et la chaleur spécifique à volume constant c_v.

Chaleurs spécifiques c_p, à pression constante de quelques gaz en kJ/kg.°C à 0 °C et sous 760 mm de mercure

Air 1	Dioxyde de carbone 0,88
Oxygène 0,92	Chlore 0,48
Azote 1,06	Dioxyde de soufre 0,63
Ammoniac 2,09	

Les valeurs du rapport

$$= \frac{C_p}{C_v}$$

sont sensiblement
pour les gaz monoatomiques: 1,67
pour les gaz diatomiques : 1,4
pour les gaz polyatomiques : 1,3

7.1.2. Vapeur d'eau

A. Vapeur saturante ou saturée

Vapeur en présence de la phase liquide génératrice; elle est dite sèche si elle ne contient aucune gouttelette d'eau.

Enthalpie d'une vapeur: c'est la quantité totale de chaleur nécessaire pour transformer 1 kg d'eau prise à 0 °C en vapeur saturée à la température t OC. Elle est la somme de la chaleur d'échauffement de l'eau de 0 à t °C (enthalpie de l'eau) et de la chaleur de vaporisation à t °C correspondant à l'énergie nécessaire qu'il faut fournir pour transformer à t °C 1 kg d'eau en 1 kg de vapeur.

On peut, en première approximation, utiliser la formule de Regnault qui donne l'enthalpie en fonction de la température en °C

en $kJ.kg^{-1}$ 2538 + 1,276 t,
en $kcal.kg^{-1}$ 606,5 + 0,305 t.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

B. Vapeur humide

Vapeur contenant des gouttelettes d'eau, caractérisée par son titre x : masse de vapeur en kg contenue dans 1 kg du mélange.

C. Vapeur surchauffée

Vapeur dont la température est supérieure à celle de la vapeur saturante à la pression considérée. En première approximation elle se comporte comme un gaz parfait.

L'enthalpie d'une vapeur surchauffée peut être calculée par la formule

en $kJ.kg^{-1}$ $2538 + 1{,}276t + c_p\,(t - t_l)$,

en $kcaLkg^{-1}$ $606{,}5 + 0{,}305\,t + c_p\,(t - t_1)$.

$t - t_1$ étant l'écart de température entre la vapeur saturée et la vapeur surchauffée à pression constante. En première approximation on peut prendre $c_p = 2{,}1$ $kJ.kg^{-1}$.. Cette formule permet en particulier d'estimer l'enthalpie de l'eau évaporée dans un four d'incinération d'où les gaz sortent à la température t, t_1 étant dans ce cas égal à 100 °C.

D. Diagramme de la vapeur d'eau

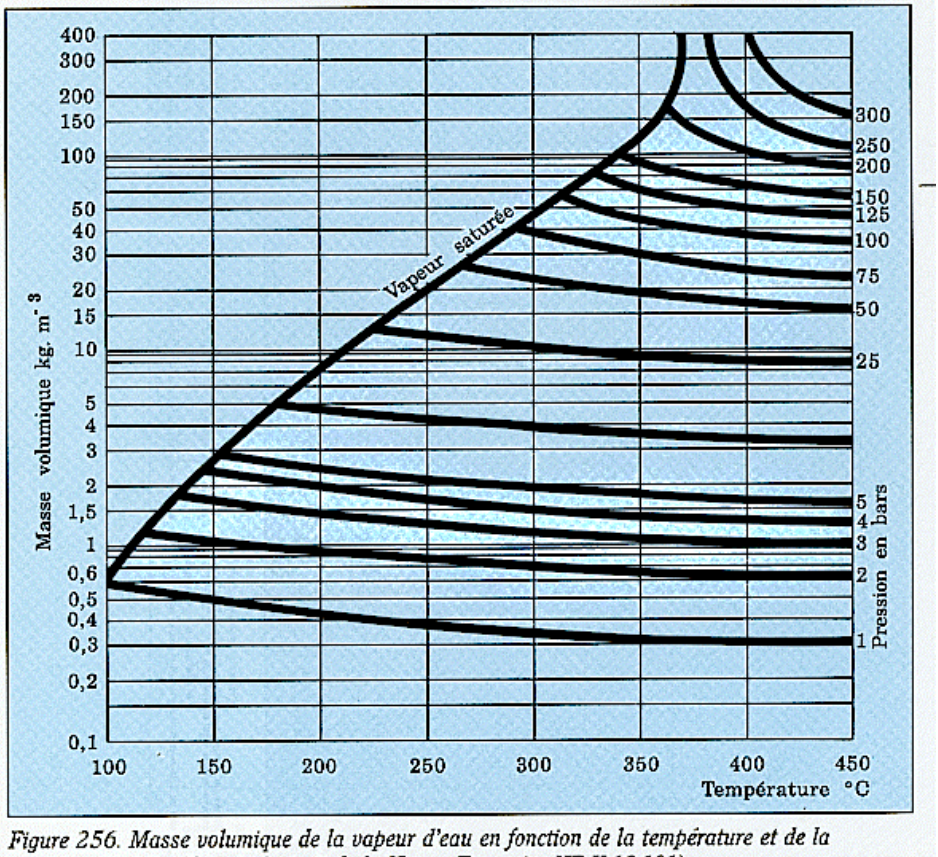


Figure 256. Masse volumique de la vapeur d'eau en fonction de la température et de la pression. D'après Chenais (extrait de la Norme Française NF X 10.101).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

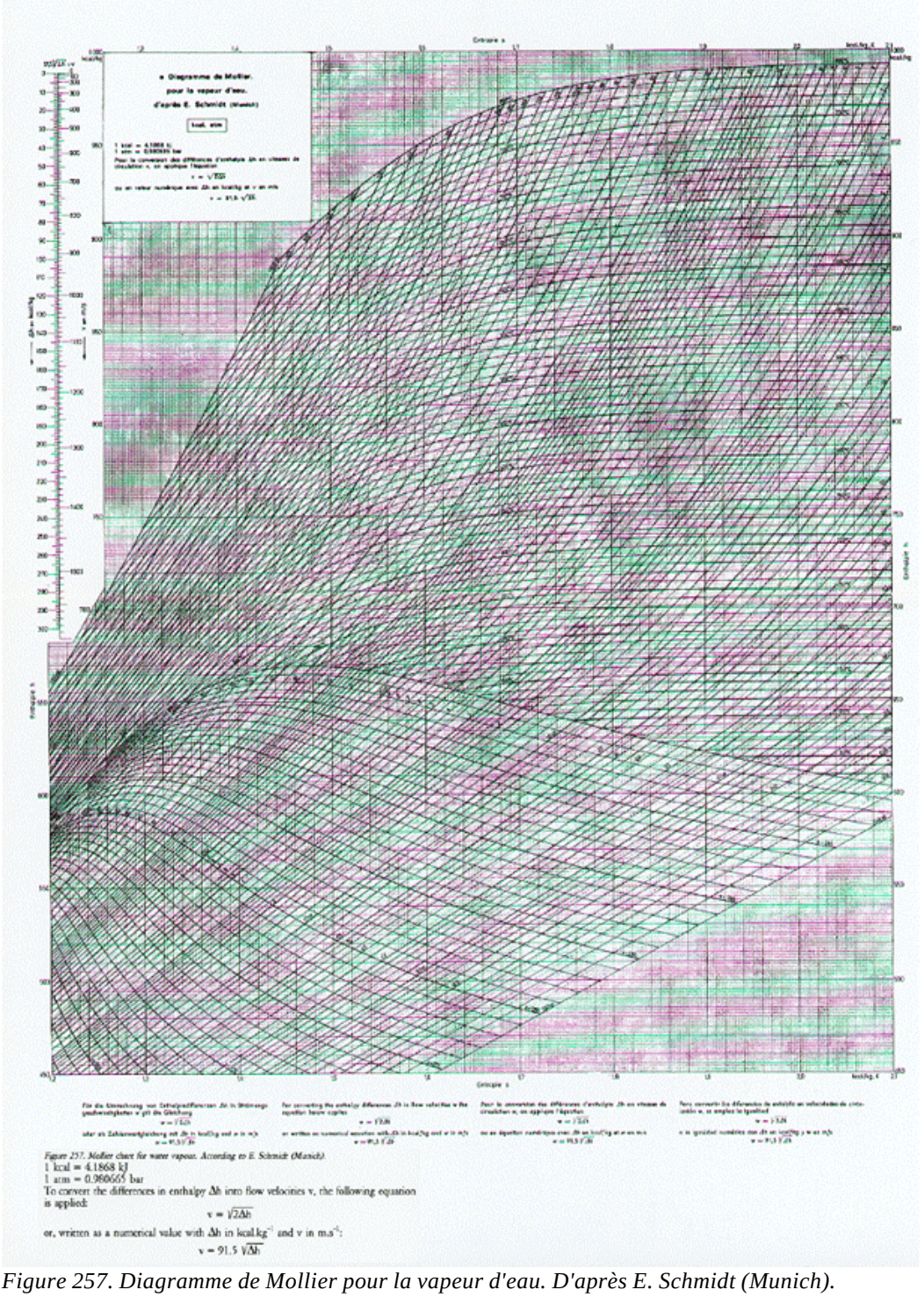


Figure 257. Mollier chart for water vapour. According to E. Schmidt (Munich).
1 kcal = 4.1868 kJ
1 atm = 0.980665 bar
To convert the differences in enthalpy Δh into flow velocities v, the following equation is applied:

$$v = \sqrt{2\Delta h}$$

or, written as a numerical value with Δh in $kcal.kg^{-1}$ and v in $m.s^{-1}$:

$$v = 91.5\sqrt{\Delta h}$$

Figure 257. Diagramme de Mollier pour la vapeur d'eau. D'après E. Schmidt (Munich).

1 kcal = 4,1868 kJ
1 atm = 0,980605 bar
Pour la conversion des différences d'enthalpie ?h en vitesses de circulation v
on applique l'équation:

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

$$v = \sqrt{2\Delta h}$$

ou en valeur numérique avec ?h en $kcal.kg^{-1}$ et v en $m.s^{-1}$:

$$v = 91{,}5\sqrt{\Delta h}$$

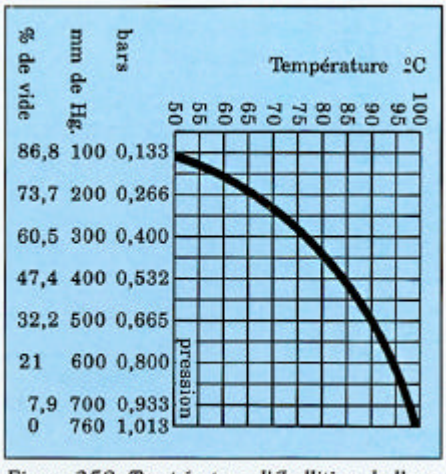


Figure 258. Température d'ébullition de l'eau sous vide.

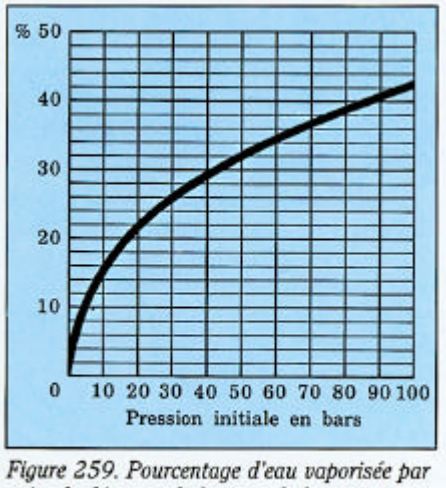


Figure 259. Pourcentage d'eau vaporisée par suite de détente adiabatique de la vapeur saturante à la pression atmosphérique.

7.1.3. Gaz humides

A. Définitions

- **Température sèche:** température d'un gaz humide non saturé mesurée par un thermomètre sec.

Température humide: température d'un gaz humide qui se sature au contact d'une nappe liquide.

- **Point de rosée ou température de rosée:** température à laquelle la vapeur contenue dans le gaz commence à se condenser par refroidissement à une température donnée.
- **Pression de vapeur saturante:** pression partielle de vapeur dans le gaz au point de rosée.
- **Humidité relative:** rapport de la pression partielle de vapeur d'eau dans le gaz à la pression de vapeur saturante correspondant à la température sèche de ce gaz. Elle s'exprime généralement en %.

B. Teneur en vapeur d'eau d'un gaz (m)

Si P est la pression totale du gaz de masse molaire M et p_v la pression partielle de vapeur, la teneur m en eau d'un gaz en $kg.kg^{-1}$ de gaz sec est donnée par :

$$m = \frac{18}{M} \frac{p_v}{M - p_v}$$

Dans le cas de l'air :

$$m = 0{,}622 \frac{p_v}{p - p_v}$$

Ainsi, pour un air saturé d'humidité à 20 °C sous pression atmosphérique normale P = 1,013 bar; p_v = 0,023 bar; m = 0,0147 $kg.kg^{-1}$.

C. Enthalpie d'un gaz humide

Les chaleurs de mélange pouvant être considérées comme négligeables, l'enthalpie d'un gaz humide est égale à la somme des enthalpies du gaz sec et de la vapeur.

Pour l'air, l'enthalpie est donnée par les formules suivantes

en $kJ.kg^{-1}$ gaz sec: 2490 m + (1 + 1,97 m)t,

en $kcal.kg^{-1}$ gaz sec: 595 m + (0,24 + 0,47 m)t.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7.2. NOTIONS DE THERMIQUE

Les limites d'inflammabilité du mélange d'un comburant et d'un carburant correspondent aux rapports extrêmes de quantités de ces deux produits permettant la réalisation de leur combustion lorsque les conditions d'amorçage de cette combustion sont effectivement remplies.

La chaleur de combustion est la quantité de chaleur dégagée au cours de la combustion d'un corps poussée jusqu'à son oxydation totale. Dans le cas d'un corps composé, cette chaleur est égale à la somme de sa chaleur de formation et de celles libérées par la combustion de chacun de ses éléments.

7.2.1. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est la chaleur de combustion rapportée à l'unité de masse ou de volume du combustible. On distingue:

- **le pouvoir calorifique sur pur:** quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de masse ou de volume du combustible exempt d'humidité, de matières minérales et de gaz incombustibles.
- **le pouvoir calorifique sur sec** qui s'applique à l'unité de masse ou de volume du combustible débarrassé de son humidité.
- **le pouvoir calorifique sur brut** qui prend en compte la présence de tous les combustibles dans l'unité de masse ou de volume du produit.

Si le combustible contient de l'hydrogène ou des composés hydrogénés, ceux-ci se retrouveront sous forme d'eau dans les produits de la combustion. Selon l'état de cette eau, gazeux ou liquide, on définit le pouvoir calorifique inférieur ou le pouvoir calorifique supérieur.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) ne comprend pas la chaleur de vaporisation de l'eau contenue dans les produits de combustion (on considère donc que cette eau reste sous forme de vapeur). Il s'exprime normalement dans le système S.I. en $kJ.kg^{-1}$ ou $kJ.m^{-3}$ et encore, communément, en $mth.kg^{-1}$ ou $mth.m^{-3}$.

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) comprend la chaleur de vaporisation de l'eau formée en cours de combustion, mais non celle de l'eau pouvant être présente dans certains combustibles gazeux. La définition du PCS suppose donc que la totalité de l'eau provenant de l'humidité du combustible et de la combustion se trouve à l'état condensé dans les produits de combustion. L'eau amenée par le comburant (air humide) est supposée rester à l'état de vapeur.

La différence entre le PCI et le PCS correspond à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Le PCI, qui est seul utilisé dans le calcul des installations, se déduit du PCS après détermination de la teneur en hydrogène et en eau du combustible. Le tableau 61 donne quelques valeurs moyennes de PCI.

L'écart entre le PCS et le PCI ramené aux seules matières organiques sèches est de l'ordre de 10 à 15 %; pour le fuel domestique, il est de 5 à 9 %.

Les études économiques font généralement appel à la notion **de tonne d'équivalent pétrole** (tep). 1 tep équivaut à la valeur énergétique d'une tonne de gaz liquéfié ou 1000 m^3 de gaz naturel.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 61. Exemples de valeurs moyennes de PCI

Désignation	PCI			
	kJ.kg $^{-1}$	**mth.kg $^{-1}$**	**kJ.m $^{-3}$**	**mth.m $^{-3}$**
Houille grasse (sur brut)	31000	7 400		
Boues d'ERU (par kg de MV)	21000	5 000		
Fuel-oil domestique	43 000	10 000		
Ordures ménagères	5 000 à 8 000	1200 à 1900		
Propane commercial			45 800	11000
Butane commercial			44 600	10 700
Gaz de cokerie			26 000 à 33 000	6 200 à 7 900
Gaz naturel (Lacq)			49 300	11800
Gaz de digestion			22 000	5 300

7.2.2. Combustion

Parmi les combustions conventionnelles, dans lesquelles le comburant est l'air atmosphérique, on distingue

- **la combustion théorique:** la quantité d'air mise en oeuvre est égale au pouvoir comburivore du combustible (voir ci-dessous). Cette combustion est incomplète,
- **la combustion oxydante et semi-oxydante :** la quantité d'air mise en couvre est supérieure au pouvoir comburivore du combustible. Cette combustion avec excès d'air est complète dans le premier cas, incomplète dans le second,
- **la combustion réductrice et semi-réductrice :** la quantité d'air donnée au combustible est inférieure à son pouvoir comburivore, elle est complètement absorbée dans le premier cas et partiellement dans le second,
- **la combustion mixte:** elle donne des fumées dans lesquelles on retrouve de l'oxygène non utilisé et des imbrûlés. C'est une combustion que l'on rencontre parfois dans la pratique en raison de difficultés technologiques.

On appelle **combustion neutre** une combustion s'effectuant de façon complète avec la quantité de comburant nécessaire et strictement suffisante pour qu'il en soit ainsi. Une telle combustion correspond à une notion théorique et est difficilement réalisable en pratique. Elle permet cependant la définition d'un certain nombre de paramètres caractéristiques d'une combustion.

Le pouvoir comburivore d'un combustible est la quantité d'air strictement nécessaire pour assurer la combustion neutre de l'unité de ce combustible. Pour les combustibles solides et liquides on peut considérer en première approximation qu'il est de l'ordre de 1 Nm^3 d'air.kg^{-1} pour un PCI de 4 000 kJ.kg^{-1}.. Pour les combustibles gazeux, la valeur est la même mais ramenée non plus au kg mais au m^3 dans les conditions normales. Pour les boues résiduaires urbaines, il est de l'ordre de 6,5 Nm^3.kg^{-1} de MV.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le pouvoir fumigène d'un combustible est la quantité de fumées résultant de la combustion neutre de ce combustible. En pratique on utilise généralement la notion de **pouvoir fumigène sur fumées humides.** On suppose dans ce cas que la vapeur d'eau n'est pas condensée. On peut en première approximation, le déterminer par les formules de Véron qui donnent

- pour un combustible solide: 1 $Nm^3.kg^{-1}$ par 3 500 $kJ.kg^{-1}$ de PCI,
- pour un combustible liquide: 1 $Nm^3.kg^{-1}$ par 3 800 $kJ.kg^{-1}$ de PCI,
- pour un combustible gazeux : 1 $Nm^3.Nm^{-3}$ par 3 500 $kJ.Nm^{-3}$ de PCI,

(non valable pour les gaz pauvres, de PCI inférieur à 8 000 $kJ.Nm^{-3}$)

.

7.3. NOTIONS D'ÉCHANGE DE CHALEUR

7.3.1. Définitions

La **conduction** correspond au transport de chaleur entre deux corps en contact à températures inégales ou entre deux parties d'un même corps dont les températures sont différentes.

Le flux de chaleur Ø transmis par conduction sur une longueur x au travers d'une surface S perpendiculaire à ce flux est donné par la loi de Fourier

$$\phi = \lambda S \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{x}$$

?1- ?2 représentant la chute de température sur la distance x, ? étant le coefficient de conduction thermique du matériau exprimé en pratique en $mth/m^2.h$ et par degré Celsius.

Pour la plupart des solides, a est une fonction quasi linéraire de la température: a ? = $?_o$ (1 + a?); a est généralement positif pour les isolements et négatif pour les métaux, l'aluminium et le laiton faisant exception. Toutefois, la variation du coefficient de conduction thermique avec la température est relativement faible. Entre 0 et 100 °C, on peut adopter en première approximation les valeurs suivantes pour:

	W/m.K	mth/m.h. °C
acier doux à 1 % de carbone	45	39
acier inoxydable (72 CN 18-10)	15	13
cuivre pur	384	330
aluminium	200	175
laiton à 30% de zinc	99	85
laine de verre	0,038	0,033
liège expansé	0,040	0,035
polystyrène expansé	0,035	0,030

A température ambiante on peut adopter:

- pour l'eau calme ? = 0,58 W/m.K [0,5 mth/m.h. °C],
- pour l'air au repos a = 0,027 W/m.K [0,23 mth/m.h.°C].

L'équation de Fourier peut encore s'écrire sous la forme :

$$\phi = \frac{\Delta\vartheta}{R} \text{ avec } R = \frac{x}{\lambda S}$$

Dans le cas de la conduction au travers de plusieurs matériaux en série on écrit pour une chute totale de température ? ?

$$\phi = \frac{\Delta\vartheta}{\Sigma R}$$

La **convection** correspond au transport de chaleur à l'intérieur d'un fluide à partir d'un solide sous l'effet de mouvements

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

soit dus à des différences de densité (convection naturelle) soit provoqués par des moyens mécaniques (convection forcée).

En pratique, le transfert de chaleur entre un corps solide à la température ? et un fluide à la température $?_1$ met en jeu les deux processus de convection et de conduction, ce qui rend le phénomène particulièrement complexe. On définit alors un coefficient global de transmission k tel que

$$\varnothing = kS\,(?-?_1)$$

Dans un même système d'unités, la valeur de k dépend de certaines propriétés physiques du fluide, de sa vitesse de circulation, de la géométrie du solide. Les valeurs de k peuvent donc varier énormément. On a, par exemple, les valeurs suivantes

	W/m2.K	**mth/m 2.h. °C**
eau en ébullition	1700 à 50000	1500 à 45 000
vapeur d'eau condensée en film	5 800 à 17 000	5 000 à 15 000
chauffage ou refroidissement de l'eau	300 à 17000	250 à 15 000
chauffage ou refroidissement de l'air	1,2 à 45	1 à 40

Le **rayonnement** correspond à une transmission de la chaleur sous forme d'énergie rayonnée. Ce phénomène qui se produit sans support matériel peut donc avoir lieu dans le vide.

La loi de Stefan-Boltzmann donne le flux de chaleur émis par rayonnement

$\varnothing = k\,e\,ST^4$.

T étant la température absolue du corps rayonnant, e un facteur d'émission égal à 0 pour un réflecteur parfait et à 1 pour le corps noir et k une constante dimensionnelle.

7.3.2. Échangeurs de chaleur

La quantité de chaleur traversant une paroi s'écrit sous la forme

$$Q = kS\,d_m$$

- S est la surface d'échange en m^2,
- d_m est la différence moyenne de température de part et d'autre de la paroi, caractérisée par la moyenne logarithmique des températures d'entrée et de sortie des fluides,
- k est le coefficient global de transmission en $W/m^2.K$ ou en $mth./m^2.h.\ °C$ dépendant de la nature et des conditions d'écoulement des fluides et des caractéristiques de la paroi,
- Q est exprimé en watts ou en $mth.h^{-1}$ suivant le système d'unités adopté.

- **Détermination du coefficient global de transmission**

Dans le cas de transfert de chaleur par conduction et convection forcée (cas des échangeurs de chaleur dans le traitement des boues), une formulation mathématique permet de déterminer un coefficient théorique de transmission dans le cas de surface cylindrique. En fait, étant donné une certaine dispersion de la, qualité des boues et du liquide interstitiel, le coefficient de transmission est essentiellement expérimental.

Exemples

- dans la digestion des boues, le coefficient d'échange peut prendre des valeurs atteignant 1300 $W.m^2.k$ [1100 $mth.m^2.h\ °C$] pour des vitesses de fluides comprises entre 1 et 2 $m.s^{-1}$,
- dans le traitement thermique des boues, avec des échangeurs boues-boues, le coefficient d'échange peut atteindre 350 $W.m^2.k$ [300 $mth.m^2.h.\ °C$] pour des vitesses de fluides allant de 0,5 à 1 $m.s^{-1}$..

- **Détermination de la moyenne logarithmique des températures**

Soit un échangeur de chaleur à contre-courant dans lequel circulent deux fluides.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

	fluide 2 (chaud)	
To	→	T1
	(fluide 1 (froid)	
t1	←	t2

La moyenne logarithmique est donnée par la relation

$$d_m = \frac{d_1 - d_2}{\log \frac{d_1}{d_2}}$$

avec : $d_1 = T_0 - t_1$

$d_2 = T_1 - t_0$

La table de Hausband (tableau 62) facilite le calcul de d_m en donnant

$\frac{d_m}{d_1}$

en fonction

de $\frac{d_2}{d_1}$ avec $d_1 > d_2$

Tableau 62. Table de Hausband

$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{d_m}{d_1}$	$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{d_m}{d_1}$	$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{d_m}{d_1}$
0,01	0,215	0,16	0,458	0,70	0,843
0,02	0,251	0,18	0,478	0,75	0,872
0,03	0,277	0,20	0,500	0,80	0,897
0,04	0,298	0,22	0,518	0,85	0,921
0,05	0,317	0,24	0,535	0,90	0,953
0,06	0,335	0,26	0,557	0,95	0,982
0,07	0,352	0,30	0,583	1,00	1,000
0,08	0,368	0,35	0,624		
0;09	0,378	0,40	0,658		
0,10	0,391	0,45	0,693		
0,11	0,405	0,50	0,724		
0,12	0,418	0,55	0,756		
0,13	0,430	0,60	0,786		
0,14	0,440	0,65	0,815		

Remarque: il est démontré mathématiquement que si

$0{,}5 < \frac{d_2}{d_1} < 2,$

l'écart entre la moyenne logarithmique et la moyenne arithmétique est inférieur à 5 %. Cette remarque justifie le fait que soit employée la moyenne arithmétique dans la plupart des échangeurs utilisés dans le traitement de boue.

7.4. RÉFRIGÉRANTS

Le refroidissement d'eau chaude est assuré par l'air au moyen de trois types de réfrigérants (voir page 59)

- **réfrigérants "humides" ou atmosphériques** dans lesquels l'eau est en contact avec l'air et le transfert des calories est assuré principalement par évaporation partielle de l'eau et enrichissement en humidité de l'air (85 à 90 % de l'échange) et aussi par échauffement direct de l'air ou convection. Cet échange dépend de l'humidité de l'air,
- **réfrigérants "secs" ou aéro-réfrigérants** dans lesquels l'eau circule dans des tubes à ailettes et n'est pas en contact avec l'air; le transfert de calories est assuré par le seul échauffement de l'air,
- **réfrigérants secs humides ou hybrides** dans lesquels un arrosage extérieur des tubes abaisse la température de l'air (figure 260) en améliorant le rendement de l'appareil.

Le fonctionnement des réfrigérants est défini, entre autres paramètres, par

- **l'écart** ou différence des températures chaude et froide de l'eau, (valeur de 10 °C et 12 °C souvent recherchée),
- **l'approche** ou différence entre la température de l'eau refroidie et celle de l'air froid humide (réfrigérants humides), qui peut atteindre 5 à 6 °C, ou celle de l'air froid sec (réfrigérants secs) d'un ordre de grandeur voisin.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

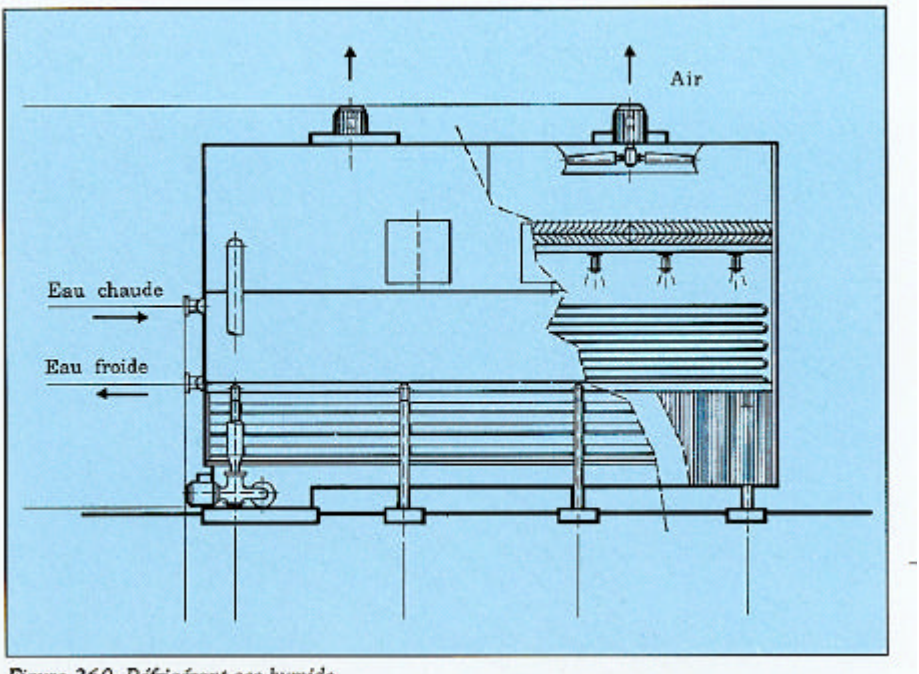


Figure 260. Réfrigérant sec humide.

Dans un **réfrigérant humide**, l'approche dépendant de la différence des enthalpies d'eau et d'air n'est pas constante quand la température de l'air humide froid varie (cf. figure 261) et l'emploi de réfrigérants à tirage naturel est surtout adopté pour les grands débits et pour des températures basses (air rechauffé moins lourd). En partant des relations de convection et d'évaporation, Merkel (1925) a établi une équation approchée caractérisant l'échange thermique global

$M\ d\ C_e = K\ (H-H')\ S$, avec
M : masse d'eau en refroidissement,
d : variation de température de cette eau,
C_e : chaleur spécifique de l'eau,
H : enthalpie de l'air saturé à la température de l'eau,
H' : enthalpie de l'air en contact avec l'eau,

K : coefficient d'évaporation,
S : surface d'échange.

Dans le calcul, on considère le rapport $\frac{KS}{M'}$ sans dimensions, et qui peut varier de 0,7 à 2.

Dans un **réfrigérant** sec, l'approche est constante lorsque la température varie.

- **Refroidissement d'eaux sales**

En recirculation d'eau de lavage de gaz ou en refroidissement d'eaux résiduaires avant épuration, les réfrigérants peuvent être affectés par des difficultés d'entartrage, de salissure, sinon de corrosion. Ces difficultés peuvent être limitées en constituant la surface d'échange non plus par des filins ruisselant sur des garnissages mais par des projections de goutelettes d'eau sur des caillebotis en matière plastique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

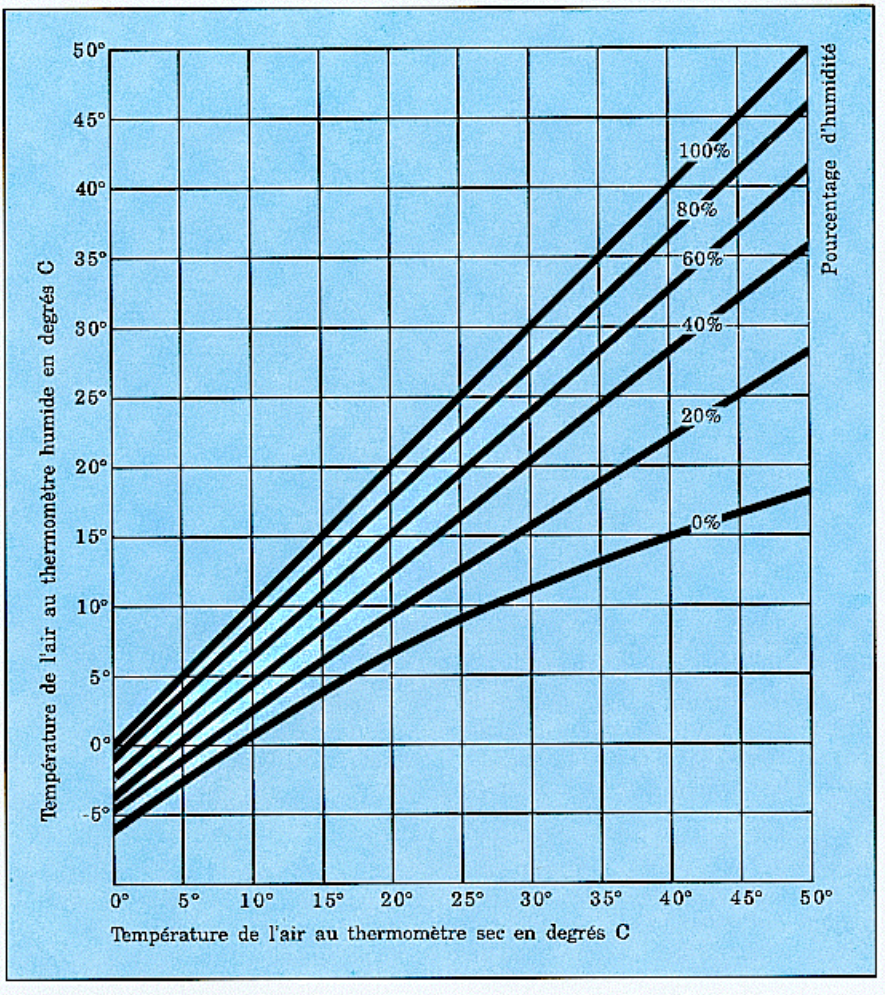


Figure 261. Conversion des températures. Thermomètres sec et humide en fonction des humidités relatives de l'air.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

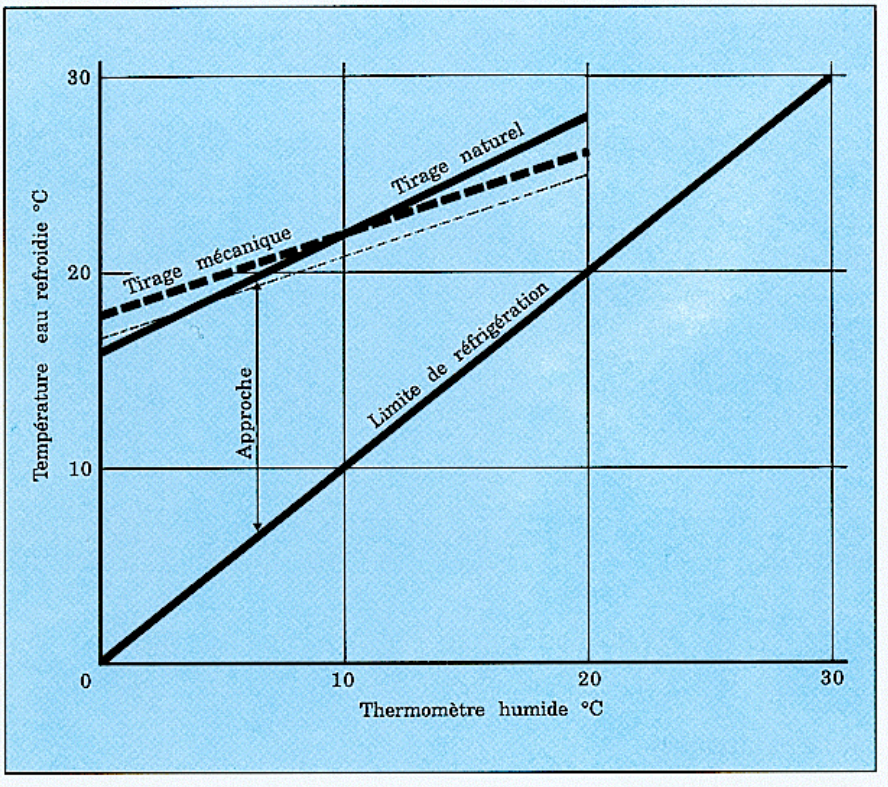


Figure 262. Incidence du thermomètre humide sur l'approche de réfrigérants humides.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7.5. DILATATION DES MATÉRIAUX

Tableau 63. Coefficients de dilatation linéique de quelques solides.

Désignation	**Masse volumique** kg.dm^{-3}	**Coefficient de dilatation linéique entre 20 et 100 C** [m/m. °C] x 10^{6}
Métaux		
Acier au carbone ordinaire	7,85	12,4
Acier inoxydable austénitique	7,9	16,5
Acier inoxydable ferritique	7,7	10,5
Acier réfractaire	7,9	15,5
Aluminium	2,70	23,8
Bronze	8,9	15,5
Cuivre	8,9	16,8
Étain	7,28	27
Fer	7,87	11,4
Fonte grise	7,2	11 à 12
Fonte alliée à graphite sphéroïdal	7,4	17,5 à 19,5
Laiton à 35 % de Zn	8,45	20,3
Plomb	11,4	28,6
Titane	4,5	8,35
Zinc	7,14	30
Matières plastiques		
Acétal (résine) (Delrin)	1,4	130
Époxyde renforcé par du tissu de verre (40 % de résine)	1,7 à 1,8	10
Polyester renforcé par du tissu de verre (40 % de résine)	1,8	30
Polyamide 6 (Nylon)	1,12 à 1,15	70 à 140
Polyamide 11 (Rilsan)	1,04	110 à 150-
Polycarbonate (Makrolon)	1,20	60 à 70
PVC	1,35 à 1,45	50 à 180
PVC surchloré	1,50 à 1,55	60 à 80
PEHD	0,95	110 à 140
Polymétacrylate (Plexiglas)	1,17 à 1,20	50 à 90
PP	0,9	70 à 150
PTFE (Téflon)	2,1 à 2,3	80 à 120
PS choc	1 à 1,1	35 à 210

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

9
PRÉTRAITEMENTS

INTRODUCTION

Les eaux brutes doivent généralement subir, avant leur traitement proprement dit, un prétraitement qui comporte un certain nombre d'opérations uniquement physiques ou mécaniques. Il est destiné à extraire de l'eau brute la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature ou la dimension constituerait une gêne pour les traitements ultérieurs.

Les opérations de prétraitement sont les suivantes (une station de traitement peut comporter une ou plusieurs de ces opérations, suivant son importance et la qualité de l'eau brute)

- dégrillage,
- dilacération,
- dessablage,
- débourbage,
- dégraissage, fréquemment associé au dessablage,
- déshuilage,
- tamisage,
- évacuation et traitement des sous-produits.

Les termes de dégrillage et de tamis age sont à préciser, car les deux procédés sont mécaniques. Le terme de grille est réservé à des supports présentant des ouvertures de largeur définie, généralement supérieure à 5 mm, mais de très grande longueur, dont le nettoyage s'effectue par voie mécanique (raclage). Parallèlement, l'usage a consacré le terme de tamis à des supports minces, à orifices circulaires ou sensiblement carrés, ou à mailles croisées, offrant un passage généralement inférieur à 3 mm, ces tamis pouvant être fixes ou rotatifs, avec nettoyage mécanique ou hydraulique.

Toutefois, l'évolution technologique permet de réaliser éventuellement l'opération de tamisage au moyen de grilles très fines adaptées, à largeur de fentes pouvant être inférieure à un millimètre. Ces grilles permettent, comme les tamis fins, une certaine réduction de la DBO_5 d'ERU.

1. DÉGRILLAGE

1.1. CONDITIONS D'UTILISATION

Le dégrillage, premier poste de traitement, indispensable aussi bien en eau de surface qu'en eau résiduaire, permet

- de protéger les ouvrages aval contre l'arrivée de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation,
- de séparer et d'évacuer facilement les matières volumineuses charriées par l'eau brute, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements suivants, ou en compliquer l'exécution.

L'opération est plus ou moins efficace, en fonction de l'écartement entre barreaux de grille; on peut distinguer

- dégrillage fin, pour écartement inférieur à 10 mm,
- dégrillage moyen, pour écartement de 10 à 40 mm,
- prédégrillage, pour écartement supérieur à 40 mm.

Un dégrillage fin est généralement précédé d'un prédégrillage de protection.

Le dégrillage est assuré, soit par une grille à nettoyage manuel (largement dimensionnée pour réduire la fréquence des opérations de collecte des résidus), soit, de préférence, par une grille à nettoyage automatique (mécanisation obligatoire pour les gros débits ou pour des eaux très chargées). Une grille automatique est souvent protégée par une prégrille robuste devant être également mécanisée dans les installations importantes ou pour des eaux brutes très chargées en matières grossières.

Le souhait général de réduire les interventions manuelles impose de plus en plus l'automatisation du dégrillage, même sur des installations de faible importance. Celle-ci est inévitable lorsqu'il y a risque d'arrivée brutale de matières végétales (feuilles en automne) ayant tendance à "feutrer" sur la grille, ce qui peut provoquer un colmatage total en quelques instants. Elle est indispensable pour un dégrillage fin.

Les déchets recueillis sont stockés dans un réceptacle de capacité calculée en fonction de la fréquence acceptable des interventions d'évacuation.

Les espacements habituellement retenus sont:

- en eaux de surface, généralement entre 20 et 40 mm (en amont de tamis),
- en eau résiduaire urbaine, sur eau brute, de 15 à 3 0 mm (mais en amont d'un tamisage et/ou d'une décantation lamellaire, un dégrillage fin est nécessaire); sur des boues (si nécessaire), inférieurs ou égaux à 10 mm,
- sur certains effluents industriels, notamment de l'agro-alimentaire, un dégrillage fin (ou bien parfois un dégrillage moyen suivi d'un tamisage).

1.1.1 Dimensionnement hydraulique et colmatage

Par principe, la vitesse de passage à travers la grille doit être suffisante pour obtenir l'application des matières sur la grille, sans provoquer une perte de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

charge trop importante, ni entraîner un colmatage en profondeur des barreaux ou un départ des matières avec le flot; les vitesses de passage entre barreaux communément admises sont de l'ordre de 0,60 à 1,0 $m.s^{-1}$ en moyenne, avec des valeurs de 1,20 à 1,40 $m.s^{-1}$ au débit maximal.

Ces vitesses s'appliquent à la section libre de passage, grille colmatée. Le degré de colmatage (en pourcentage de la section mouillée libre) dépend de la qualité de l'eau et du système de reprise des résidus sur la grille. Pour des grilles automatiques, il peut être de l'ordre de 10
(eaux de surface) à 30 % (eaux résiduaires chargées). Pour des grilles à nettoyage manuel, la surface de grille immergée doit être calculée beaucoup plus largement pour éviter des interventions trop fréquentes.

Les vitesses d'approche en amont de la grille sont généralement faibles, en particulier dans le cas des grilles fines, à coefficient de passage inférieur à 50 %. Il est donc inévitable d'observer fréquemment des dépôts en amont de la grille et il faut les prévenir (brassage) ou les évacuer, par exemple par un autocurage journalier.

1.2. DIFFÉRENTS TYPES DE GRILLES

1.2.1. Principes généraux de construction

1.2.1.1. Grilles manuelles

Les grilles à nettoyage manuel, composées de barreaux droits, ronds ou rectangulaires, sont généralement inclinées de 60 ° à 80 ° sur l'horizontale pour faciliter le raclage. Elles sont parfois mobiles (sur glissières), ou pivotantes pour autoriser le

1.1.2. Commande automatique et protection des grilles

Le fonctionnement du dispositif de nettoyage de la grille est généralement discontinu. Il peut être commandé par un système cyclique à cadence (1 min à 1 h) et durée (1 à 15 min) réglables, à partir d'un indicateur de perte de charge différentiel, ou, mieux, par une combinaison des deux systèmes. Dans le cas d'une grille placée en aval d'un poste de pompage, la commande peut être associée au démarrage des pompes, avec temporisation (1 min-30 min) de maintien de marche.

Les grilles automatiques doivent être équipées de limiteurs d'effort permettant d'éviter une détérioration du matériel en cas de surcharge ou de blocage.

Les grilles courbes et grilles droites à nettoyage alternatif comportent normalement un dispositif assurant l'arrêt automatique du râteau en un point placé hors du champ de grille, pour éviter tout risque de coincement lors du redémarrage

.

nettoyage du canal aval si ce dernier est couvert. Dans les postes de relèvement d'eaux résiduaires, elles sont souvent remplacées par des paniers perforés relevables, évitant la nécessité d'accès, mais de manutention et nettoyage malcommodes.

1.2.1.2. Grilles à nettoyage par l'amont

Les grilles automatiques sont généralement à nettoyage par l'amont, en particulier toutes celles décrites ci-après.

Elles comportent trois types principaux, les appareils correspondant à chaque type ne différant que par des

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

détails technologiques. Le champ de grille est généralement réalisé en barreaux de section rectangulaire ou trapézoï dale (réduisant le risque de coincement des matières solides) à angles vifs ou arrondis. Certains appareils se prêtent bien à un dégrillage fin (pouvant aller jusqu'au tamisage), par utilisation d'un champ de grille adapté (genre Johnson, écartement entre quelques millimètres à 0,5 mm) ou d'une tôle perforée. L'évacuation des déchets est située à l'aval de la grille.

- **Type I : grilles courbes**

Ce type de grille est tout indiqué pour les installations de moyenne importance, lorsque les eaux ne sont pas trop chargées et que la hauteur de relevage des détritus est réduite; il a pour avantage de présenter une grande section de
passage utile et d'être d'une conception mécanique simple. Le nettoyage est assuré par un ou deux peignes montés à l'extrémité du bras tournant autour d'un axe horizontal.

- **Type II: grilles droites à nettoyage alternatif**

Le champ de grille, généralement incliné à environ 80° sur l'horizontale, est arrêté un peu au-dessus du niveau liquide maximal et prolongé par un tablier. Un dispositif alternatif (râteau, ràcleur, grappin ou poche pivotante) remonte les détritus le long du champ de grille, puis du tablier, et redescend en position écartée du champ de grille. Les détritus sont repris en position haute par un extracteur éventuellement motorisé.

Lorsque les grilles doivent traiter un très gros débit (prises d'eau de surface), supérieur par exemple à 30 000 m^3 h^{-1}, d'eau peu chargée, le nettoyage peut s'effectuer par un dégrilleur mobile n'intéressant qu'une partie de grille et se déplaçant latéralement après chaque cycle.

- **Type III: grilles droites à nettoyage continu**

Bien adaptées à un dégrillage fin avec risques de feutrage, elles doivent être précédées d'un prédégrillage si l'eau est susceptible de charrier de grosses matières. La grille, droite et inclinée à 80° environ sur l'horizontale, est nettoyée par des racleurs, des peignes ou des balais-brosses entraînés par un mécanisme à chaînes sans fin. L'éjection des déchets est généralement motorisée.

Figure 263. Poste de dégrillage à nettoyage par l'aval.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 72. Grilles mécaniques à nettoyage par l'amont.

	Type de grilles	Principe de nettoyage	Profondeur canal m	Largeur canal in	Écartement barreaux mm	Épaisseur barreaux mm	Hauteur de rejet m	Hauteur d'eau m
	Grille courbe type DC	Continu	0,75 à 1,75	0,5 à 1,6	10 à 40	10	0	0,50 à 1,5
	Grille droite hydraulique type GDH	Alternatif	0,75 à 2,80	0,6 à 1,2	10 à 40	10	0 à 1,2	0,50 à 1,5
Dégrillage moyen	Grille droite à câble type GDC	Alternatif	2,00 à 10,0	0,1 à 2,6	10 à 40	10	0,65 et 1,2	1,5 à 9,5
	Grille à crémaillère	Alternatif	1,50 à 5,00	0,6 à 2,0	12 à 80		0,65 et 1,3	
	Grille à grappin	Alternatif	2,50 à 10,0	1,5 à 10	12 à 100			
	Grille courbe fine type GFC	Continu	0,75 à 1,75	0,5 à 1,6	1 à 10		0	0,50 à 1,5
Dégrillage fin	Grille fine droite type GFD	Continu	2,0 à 10,0	1,0 à 2,6	1 à 10		0,85 et 1,2	1,5 à 9,5
	Grille mobile sans fin	Continu	0,6 à 15,0	0,3 à 4,0	1 à 15		0 à 1,2	0,4 à 14,5

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.1.3. Grilles à nettoyage par l'aval

Quelques grilles comportent un système de nettoyage avec chaînes sans fin placé en aval. Ces appareils présentent des risques de rechute dans l'eau aval d'une fraction des résidus récupérés. On peut citer néanmoins une prégrille à nettoyage par l'aval, pour eaux très chargées et à capacité d'extraction importante (fig. 263).

1.2.2. Grille courbe DC

Cette grille, du type I (figure 264), comporte :

- un champ de grille courbe en quart de cercle, maintenu en châssis rigide,
- un bras rotatif diamétral à deux peignes ajustables, avec moto-réducteur, limiteur d'effort à bras de réaction, dispositif d'arrêt automatique en position horizontale,
- un extracteur articulé silencieux avec amortisseur.

1.2.3. Grille fine courbe GFC

Cette grille, du type I, est de même conception générale que la précédente mais avec champ fin ou en tôle perforée en inox pour passage inférieur à 10 mm. Les peignes sont remplacés par des racleurs en polyuréthane ou des brosses à poils de nylon.

1.2.4. Grille droite GDH

Cette grille, du type II, utilise des vérins hydrauliques à déplacement linéaire assurant une cinématique simple (figure 265).

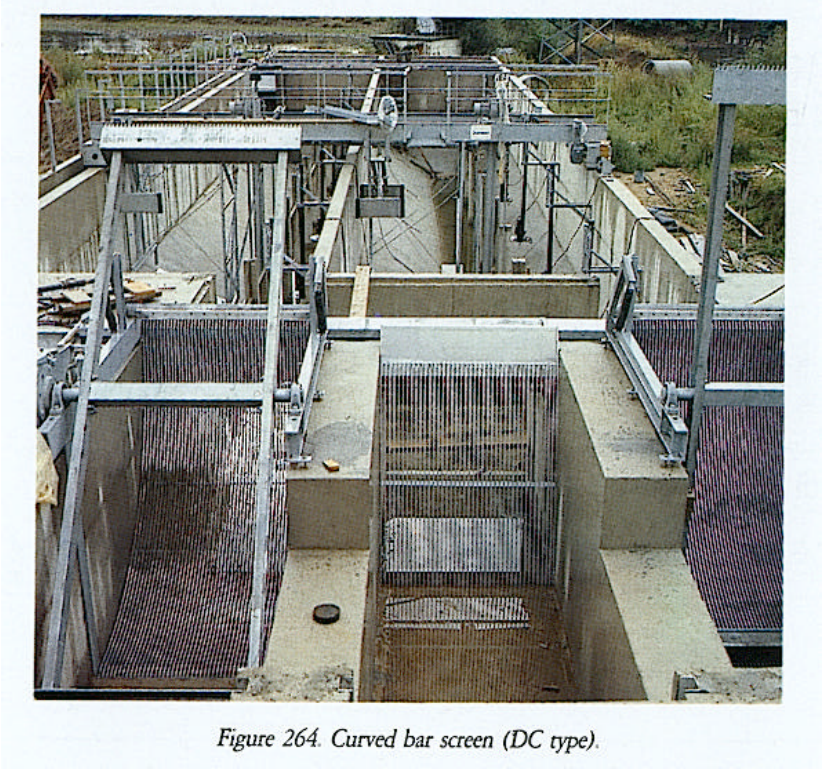


Figure 264. Curved bar screen (DC type).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Elle comporte en particulier

- un champ de grille vertical maintenu en châssis rigide (1),
- un châssis (2) s'inclinant vers l'amont grâce à un vérin (3), permettant ainsi la descente du peigne de nettoyage hors du champ de grille,
- un dispositif de nettoyage constitué d'un chariot porte peigne (4) coulissant dans le châssis mobile manoeuvré par un vérin (5),
- un éjecteur (6) actionné par un vérin.

1.2.5. Grille droite à câbles GDC

Cette grille, du type II, combine une commande du chariot porte-peigne par deux câbles. Le dispositif autorise des profondeurs d'installation importantes, avec une commande d'écartement du peigne (pour la redescente hors du champ de grille) par vérins pneumatiques, ce qui assure une grande sécurité de marche. Elle comporte (figure 266)

- un champ de grille incliné maintenu en châssis rigide (1),
- un chariot porte-peigne mobile (2), coulissant dans les guides du châssis rigide,
- un éjecteur (3) actionné par vérins.

1.2.6. Grille Erre droite GFD

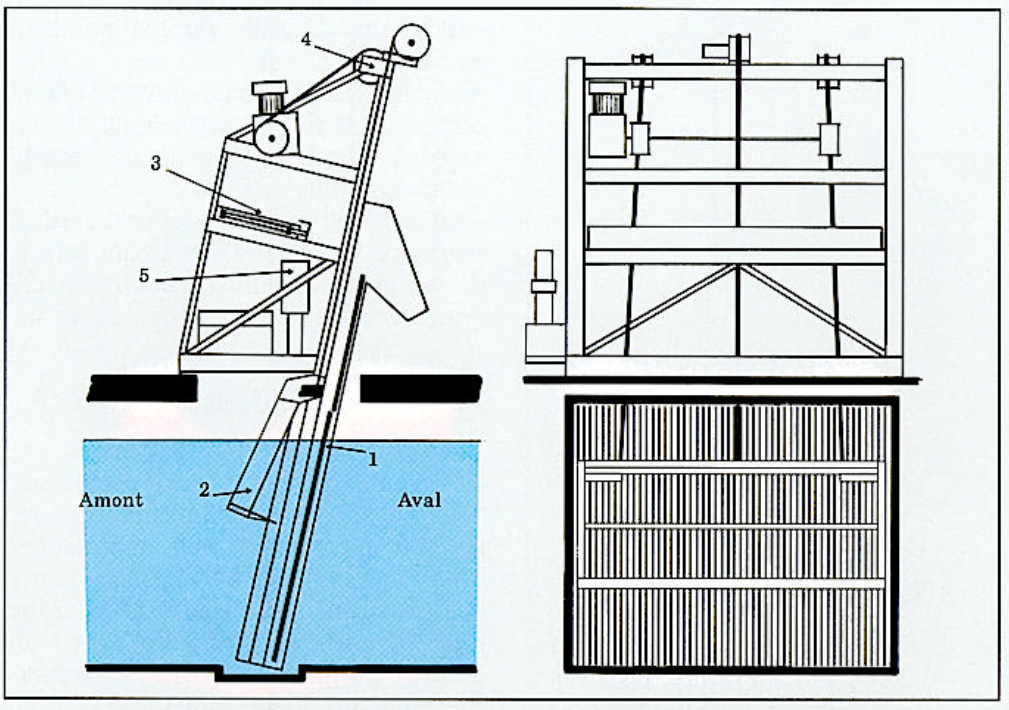
Cette grille, du type III, forme un ensemble monobloc relevable, mis en place dans des guides scellés aux parois du canal. Le nettoyage du champ de grille est assuré par des brosses entraînées par chaînes sans fin. L'ensemble comporte (figure 268)

- un champ de grille (inox) incliné monté en châssis rigide monobloc,
- un ensemble de raclage et relevage des détritus par brosses Nylon montées sur deux chaires sans fin entraînées par moto-réducteur,

1. Châssis rigide avec champ de grille. 2. Châssis mobile. 3. Vérin du châssis mobile. 4. Chariot porte peigne. 5. Vérin de relevage. 6. Éjecteur. 7. Armoire électrique 8. Protections grillagées. 9. Centrale hydraulique.

Figure 265. Schéma de principe d'une grille GDH.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1. Châssis rigide avec champ de grille. 2. Chariot porte-peigne. 3. Éjecteur. 4. Ligne d'arbre de relevage. 5. Centrale hydraulique.

Figure 266. Schéma de principe d'une grille droite GDC.

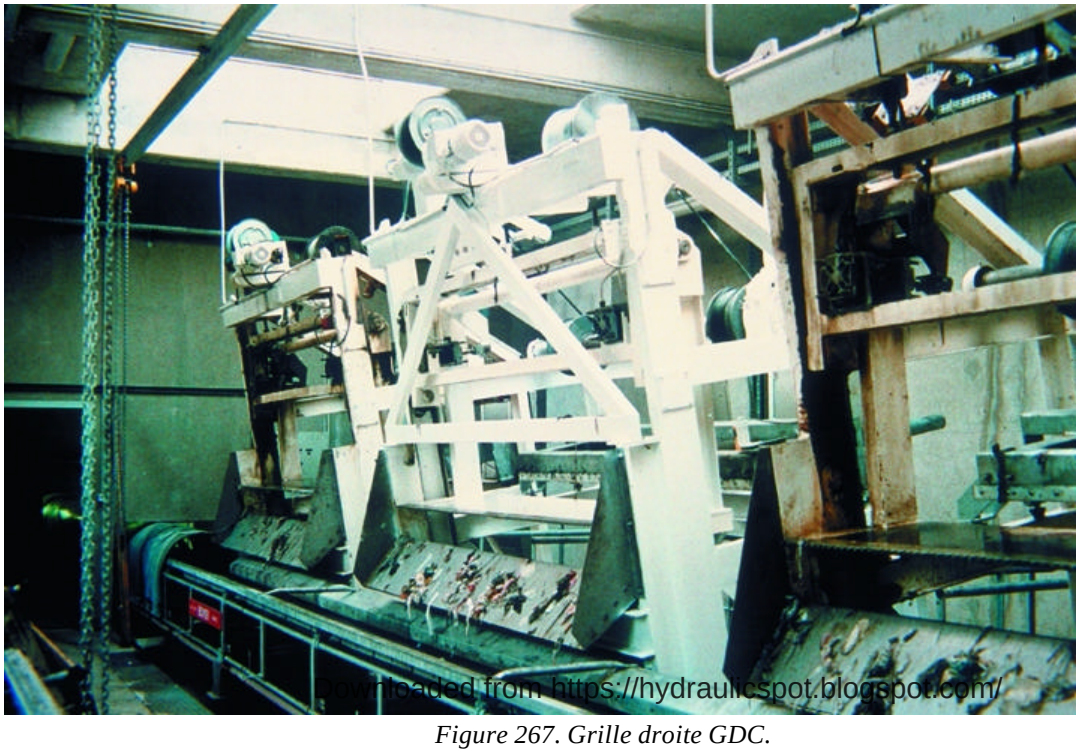

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 267. Grille droite GDC.

- un ensemble d'éjection et de nettoyage des brosses de relevage, avec rouleau-brosse rotatif entraîné par chaîne.

Figure 268. Grille fine GFD.

1.2.7. Autres grilles

câbles, le pivotement du grappin, articulé sur le chariot, étant assuré par un troisième câble axial. La construction et le fonctionnement sont simples, mais les commandes électriques (fins de course entre autres) doivent être particulièrement fiables.

- **Grille à crémaillère, à champ droit incliné**

Cette grille, du type II, est bien adaptée à un dégrillage moyen d'eaux chargées lorsque la hauteur de relèvement n'est pas importante. Sa cinématique autorise un fonctionnement mécanique simple et robuste, toute la partie mobile étant hors d'eau, à l'exception du peigne alternatif porté par deux longs bras articulés. Ces bras sont assujettis à un chariot mobile auto-moteur se déplaçant le long de crémaillères (figure 269).

- **Grille à grappin, à champ vertical**

Cette grille, du type II (figure 270), est adaptée à des débits importants d'eau chargée et à de grandes profondeurs d'installation. Les montées et descentes du chariot supportant le grappin (ou poche) sont commandées par deux

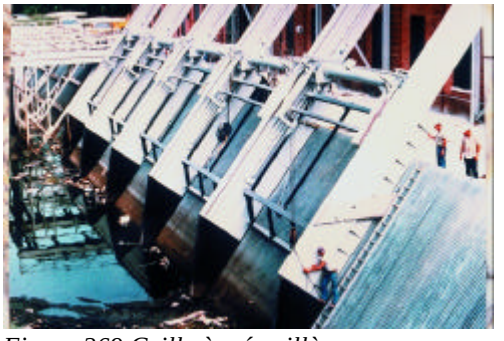


Figure 269.Grille à crémaillère.

Figure 270. Grille à grappin à champ vertical.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Grille à champ mobile sans fin**

Cet appareil est réservé à des dégrillages fins d'eaux résiduaires, après prédégrillage et dessablage. Son champ de grille est constitué d'un ensemble de peignes articulés (en matière plastique), de forme adaptée inscrite dans un cylindre, engrénant entre eux, articulés sur deux chaines sans fin latérales assurant une rotation de l'ensemble. Le mouvement relatif de deux peignes successifs assure l'évacuation des matières retenues.

1.3. DILACÉRATION

Cette opération de traitement, concernant surtout les ERU, a pour rôle de déchiqueter les matières solides charriées par l'eau, pour qu'elles poursuivent le circuit vers les stades de traitement suivants. Le but recherché est de supprimer les sujétions et nuisances provoquées par l'évacuation et la décharge des déchets de dégrillage et de bénéficier d'une certaine augmentation du volume de gaz de digestion produit. Mais la dilacération présente en pratique certains inconvénients, en particulier le risque d'agglomération en masse de fibres textiles ou végétales dilacérées associées à des graisses (bouchages de pompes et tuyauteries, éventuellement "chapeau" de boue dans les digesteurs anaérobies) et la nécessité d'interventions plus ou moins fréquentes sur un matériel assez délicat.

Pour ces raisons, la dilacération n'est plus que rarement préconisée, en France, sur eaux brutes en tête de station. Par contre, elle est parfois substituée au dégrillage fin dans le traitement des boues. Elle est alors effectuée par un dilacérateur sous-pression garantissant la finesse de dilacération désirée.

Les dilacérateurs, qu'ils soient "au fil de l'eau" ou sous-pression, sont des appareils spécialement adaptés aux ERU, capables d'absorber les matières normalement contenues dans ces eaux (après toutefois un prédégrillage grossier de 40 à 80 mm suivant l'importance des appareils utilisés) et de les réduire en éléments de quelques millimètres de diamètre moyen).

1.3.1 Dilacérateurs au fil de l'eau (eau brute)

Ils ne créent qu'une faible perte de charge et n'absorbent qu'une faible énergie. Les appareils les plus classiques comportent un tambour rotatif à axe vertical, à fentes horizontales. Dans le GRIDUCTOR INFILCO DEGRÉMONT (figure 270 bis), celui-ci est constitué par des barres circulaires équipées de dents coupantes; des peignes coupants fixes sont boulonnés au bâti. L'appareil est logé dans un canal rectangulaire ouvert à fond plat; l'eau traverse horizontalement le tambour, les matières étant déchiquetées au passage. Un autre modèle, installé de même façon, comporte deux tambours rotatifs à axes verticaux emboîtant leurs dents coupantes.

1.3.2. Dilacérateurs sous pression (eau brute et boues)

Montés entre brides et nécessairement très robustes, ils sont équipés d'un moteur électrique largement dimensionné pour faire face aux risques de bou-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

chage. En général, le système de dilacération, logé dans un carter fermé, comporte un mobile rotatif avec barres, dents et Peignes coupants, et n'assure pas la circulation de l'eau qui est obtenue par une pompe placée en série sur la conduite.

Certains appareils, d'un principe différent, comportent une hélice rotative coupante offrant une capacité de pompage (avec une faible hauteur manométrique) pouvant assurer la circulation du flux.

Tableau 73. Caractéristiques générales des dilacérateurs

Types dilacérateurs	Débits $M^3 h^{-1}$	Puissance du moteur électrique kW
Dilacérateurs au fil de l'eau	5 000 à 8 000	0,25 à 4
Dilacérateurs en ligne	50 à 300	7,5 à 20

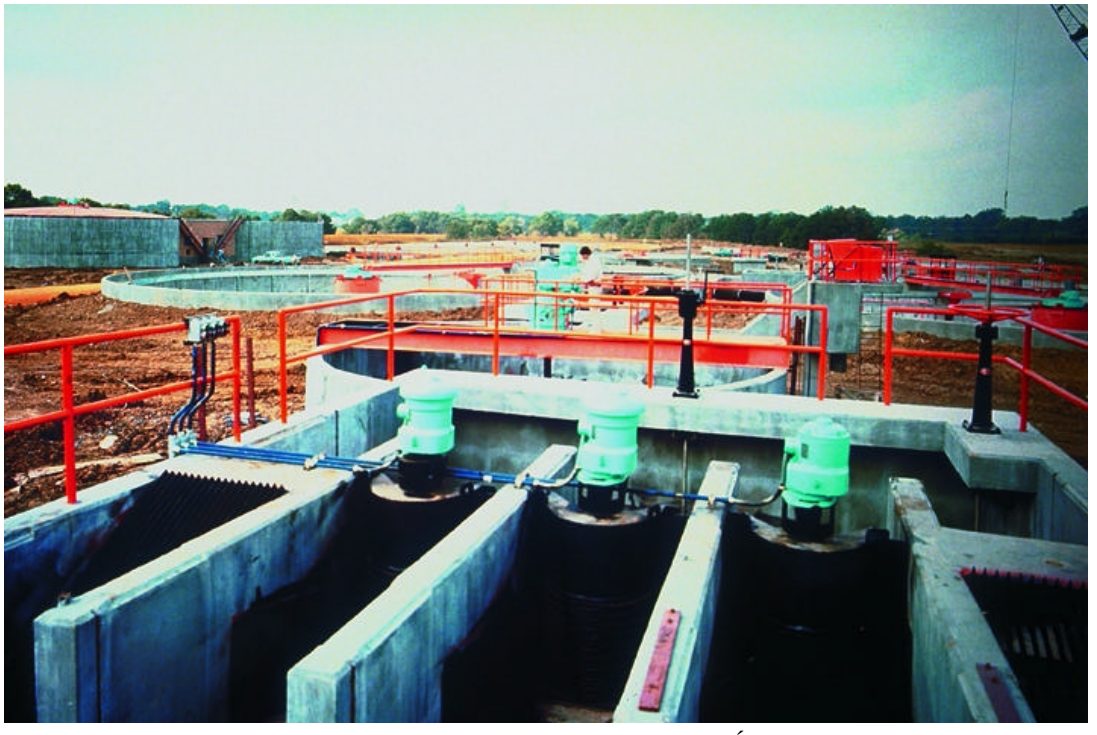


Figure 270 bis. Griductor INFILCO DEGRÉMONT.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. DESSABLAGE

2.1. CONDITIONS D'UTILISATION

Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes les graviers, sables et particules minérales plus ou moins fines, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduits, à protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion, à éviter de perturber les stades de traitement suivants. Le domaine usuel du dessablage porte sur les particules de granulométrie égale ou supérieure à 200 µm; une granulométrie inférieure est en général du ressort du débourbage ou de la décantation.

L'étude théorique du dessablage se rattache à celle de la décantation des particules grenues (voir page 158).

En pratique, on peut se baser sur les données suivantes (valables en sédimentation libre pour des particules de sable de masse volumique 2,65).

Tableau 74. Vitesse de chute corrigée des particules de sable.

d cm	0,005	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050	0,10	0,20	0,30	0,50	1,00
V, ms^{-1}	0,2	0,7	2,3	4,0	5,6	7,2	15	27	35	47	74
$V_{c'}$ cas $^{-1}$	0	0,5	1,7	3,0	4,0	5,0	11	21	26	33	
$V_{c''}$ cas $^{-1}$	0	0	1,6	3,0	4,5	6,0	13	25	33	45	65
VI $cm.s^{-1}$	15	20	27	32	38	42	60	83	100	130	190

avec:

d : diamètre de la particule de sable,

Vc : vitesse de sédimentation, pour fluide à vitesse horizontale nulle,

$V_{c'}$: vitesse de sédimentation, pour fluide à vitesse horizontale égale à VI,

$V_{c''}$: vitesse de sédimentation, pour fluide à vitesse horizontale de 0,30 $m.s^{-1}$,

VI : vitesse horizontale critique d'entraînement de la particule déposée.

En traitement d'eaux résiduaires, on souhaite extraire de l'eau un maximum de matières minérales, mais en retenant le moins possible de matières organiques (provoquant des nuisances à l'évacuation et lors du stockage des sables extraits). Cet effet de séparation nécessite un apport d'énergie qui réduit l'efficacité de la décantation. Il y a donc un compromis nécessaire entre le taux de coupure (limite de granulométrie retenue) et le taux de matières organiques accepté dans le sable.

2.1.1. Dessablage d'eau de surface

La prise d'eau doit être conçue de façon à éviter l'entraînement du sable. Si les conditions locales ne le permettent pas, il faut prévoir un dessableur à moins d'admettre de récupérer le sable dans d'autres ouvrages; en particulier, si l'installation doit comporter des débourbeurs, on peut simplement éliminer les particules de dimensions supérieures à 300 µm dans un dessableur couloir grossier à vidange par chasse hydraulique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Si l'installation comporte un tamisage (à maille de 1 à 2 mm par exemple) le dessablage doit se faire en amont pour éviter des incidents sur les tamis.

Le dessableur est généralement rectangulaire du type couloir.

La section transversale est fonction de la vitesse horizontale d'écoulement désirée: cette vitesse sera supérieure à la vitesse critique d'entraînement VI des particules déposées (tableau 74) si l'on désire effectuer une évacuation hydraulique des sables, inférieure si l'on prévoit une évacuation par raclage de fond.

La surface horizontale se calcule en divisant le débit maximal à véhiculer par la vitesse de sédimentation V_c, des particules de plus petite dimension à retenir, corrigée en fonction de la vitesse horizontale d'écoulement choisie.

On peut encore séparer le sable par cyclonage (hydro-cyclone au refoulement des pompes de relèvement). (Voir page 611).

2.1.2. Dessablage d ERU

Du fait de l'hétérogénéité du milieu, la séparation des sables et des autres matières contenues dans l'eau ne peut être qu'imparfaite, et les sables extaits contiennent toujours une certaine proportion de matières organiques qui sédimentent en même temps; cette proportion est minimisée en maintenant, au voisinage du radier de l'ouvrage, une vitesse de l'ordre de 0,3 $m.s^{-1}$, dite vitesse de balayage.

Une amélioration de la séparation peut être obtenue par un lavage des sables extraits du dessableur (voir page 630), la teneur en matières organiques des sables lavés étant alors ramenée à moins de 30 %.

La nature du produit recueilli nécessite d'utiliser des équipements particulièrement adaptés pour limiter les risques d'abrasion et de bouchage (pompes à vortex -émulseurs à air).

On utilise, par ordre croissant d'importance et d'efficacité

- le dessableur couloir simple, dans lequel la vitesse d'écoulement varie avec le débit. Ouvrage peu recommandé, d'usage limité aux petites installations sommaires. Le sable est extrait manuellement d'une cunette longitudinale, d'une capacité de stockage d'environ 4 à 5 jours;
- le dessableur couloir amélioré par la mise en place d'un déversoir de sortie à équation linéaire (hauteur d'eau proportionnelle au débit) permet de maintenir une vitesse d'écoulement constante de l'ordre de 0,3 $m.s^{-1}$). Temps de séjour d'environ 1,5 à 2 min;
- le dessableur circulaire à extraction mécanique du sable et hydraulique des matières flottantes et écumes (voir page 608). Temps de séjour d'environ 2 à 3 min;
- le dessableur rectangulaire aéré, à extraction mécanique du sable et hydraulique des matières flottantes et écumes (voir page 608). Temps de séjour d'environ 2 à 5 min.

Ces deux derniers appareils se prêtent bien à une **fonction combinée** de dégraissage (voir page 615), de plus en plus fréquemment utilisée.

2.1.3. Dessablage d ERI

Sur ERI le dessablage est moins souvent nécessaire. Les dessableurs aérés utilisés sur ERU sont quelquefois applicables (en particulier sur les effluents d'IAA).

En traitement de certains effluents des industries métallurgiques et mécaniques, le dessablage a pour but la sépara-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tion de particules très denses d'oxyde de fer, de laitier granulé ou de battitures huileuses dont les densités apparentes peu vent varier de 2,5 à 4.Ces particules, abrasives et qui décantent vite, sont pré sentes à des concentrations initiales qui s'échelonnent de 0,2 à plusieurs grammes par litre et justifient des équipements particuliers de reprise dans les dessableurs.

2.2. DESSABLEURS CIRCULAIRES

Ces ouvrages, de forme cylindro-conique, ont un diamètre de 3 à 8 m et une profondeur liquide de 3 à 5 m.

L'eau est introduite tangentiellement, en périphérie d'ouvrage ou dans un déflecteur cylindrique central; elle est reprise à travers un orifice immergé de la paroi cylindrique.

Le sable se dépose sur un radier plus ou moins incliné et se déplace par effet hydraulique, pour chuter dans une trémie centrale de stockage et reprise. La vitesse de balayage du radier est maintenue sensiblement constante à une valeur supérieure à 0,3 $m.s^{-1}$, par trois moyens caractérisant le type d'ouvrage :

- une rotation de la masse liquide par un effet de vortex obtenu grâce à l'introduction tangentielle de l'eau,
- une rotation de la masse liquide par un mélangeur mécanique rotatif à pales à axe vertical qui permet de maintenir une puissance spécifique constante de l'ordre de 10 à 20 $W.m^{-3}$, indépendante du débit, et donc de travailler à niveau liquide sensiblement constant,
- une giration (dans un plan vertical) de la masse liquide, par une insufflation d'air dans un déflecteur cylindrique central noyé, au moyen de diffuseurs adaptés. L'appareil permet également de travailler à niveau liquide sensiblement constant.

Le sable collecté dans la trémie centrale est extrait par une pompe ou un émulseur à air et envoyé dans un compartiment d'essorage gravitaire ou vers un système de récupération mécanique.

2.3. DESSABLEURS RECTANGULAIRES AÉRÉS

Ces ouvrages, dont la largeur peut aller de 4 m (ouvrage simple) à 8 m (ouvrage double), ont une profondeur liquide d'environ 4 m et une longueur maximale d'environ 30 m. Ils permettent de traiter des débits importants. La forme du radier dépend du système adopté pour la reprise des sables.

L'eau est introduite à une extrémité de l'ouvrage et est reprise à l'autre extrémité, à travers un orifice immergé, avec, fréquemment, passage sur un déversoir aval de maintien de niveau du plan d'eau.

L'ouvrage, à flux longitudinal lent, comporte un système d'insufflation d'air en ligne sur toute sa longueur, équipé de diffuseurs d'air adaptés, tels que VIBRAIR, assurant une puissance spécifique

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

d'aération de l'ordre de 15 à 30 $W.m^{-3}$.. Le niveau liquide peut être maintenu sensiblement constant. L'air insufflé assure une vitesse de circulation transversale, favorise par effet de turbulence la séparation des matières organiques agglutinées aux particules de sables, et permet une élimination partielle des matières flottantes.

L'extraction du sable est réalisée automatiquement de différentes façons :

- par un ensemble d'émulseurs à air, à fonctionnement syncopé (reprise en trémies inférieures),
- par raclage (pont-racleur) vers une fosse de collecte en extrémité, avec reprise par pompe ou émulseur à air fixe,
- par pompe suceuse ou émulseur à air, monté sur pont-mobile, et déversant le sable dilué dans une goulotte d'évacuation latérale.

Figure 271. Dessableur rectangulaire aéré.

2.4. DESSABLEURS "MÉTALLURGIE"

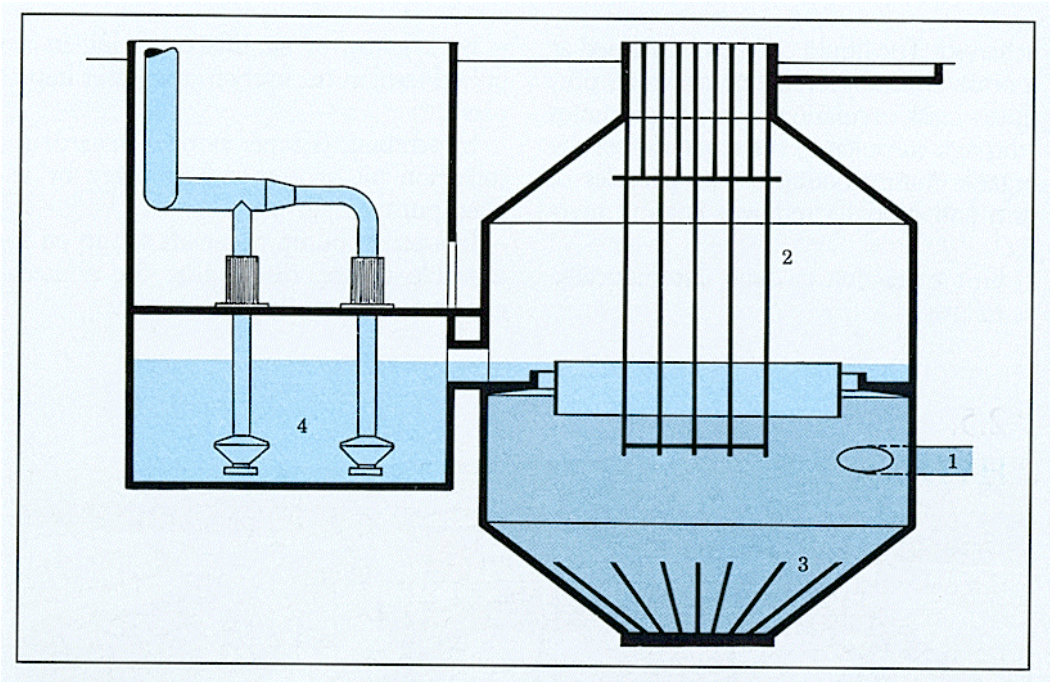
Deux techniques de dessablage sont utilisées suivant le niveau d'arrivée des eaux .

- **séparateurs tangentiels** (figure 272) souvent improprement appelés "hydrocyclones" car l'énergie centrifuge développée y est faible. Ils sont utilisés avec des niveaux d'arrivée des égouts pouvant descendre à -10 m, dans le cas de laminoirs, trains à bande ou coulées continues. Ces ouvrages cylindro-coniques ont une double fonction :
  - séparation des particules grenues par décantation verticale,
  - séparation des arrivées d'huile massives, grâce à une paroi siphoïde.

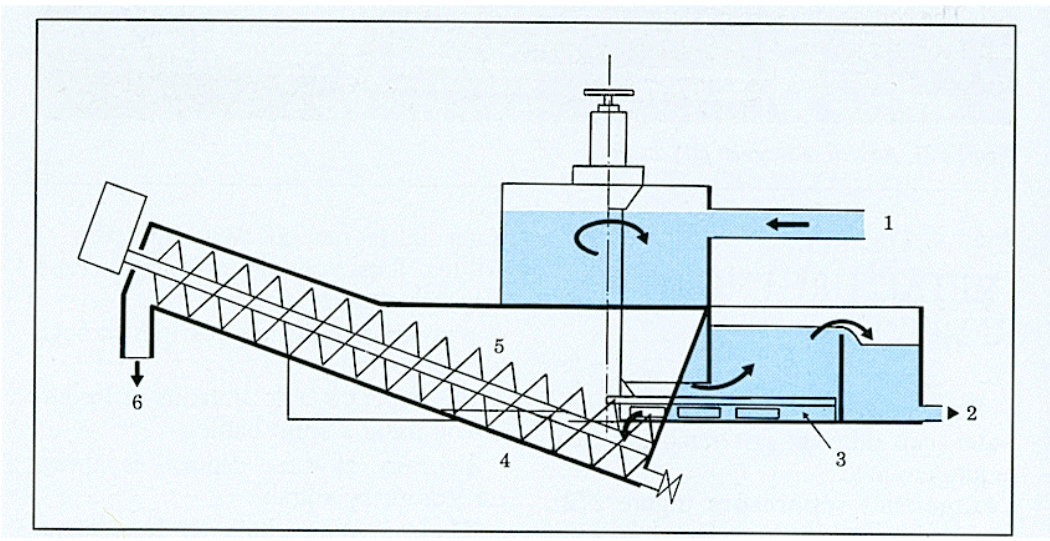
  La reprise des dépôts est toujours assurée par grappin.

  Construits par DEGRÉMONT avec des diamètres de 4 à 32 m, ces ouvrages sont situés en amont de décanteurs ou filtres. Leur pouvoir de coupure doit alors descendre à 100 µm.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1. Arrivée d'eau.
2.Guide pour grappin.
3. Protection du radier.
4. Reprise d'eau traitée
Figure 272. Séparateur tangentiel `Métallurgie':



1. Arrivée d'eau.
2. Départ d'eau traitée.
3.Bras de raclage.
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/
4. Fosse à boues périphérique
5.Vis d'évacuation de boues.
Figure 273. Séparateur classificateur « Aciérie » :

- **Séparateurs "classificateurs":** à fonction unique de dessablage des particules grenues de plus de 200 ou 250 µm. Ils sont situés en amont de décanteurs épaississeurs et protègent les pompes à boues et les équipements de déshydratation.

Construits par DEGRÉMONT avec des diamètres de 5 à 12 m, ils sont en général alimentés à partir de canalisations aériennes, et sont constitués par une zone cylindrique de décantation très rapide, sous faible hauteur d'eau. Un bras racleur diamétral à entraînement central évacue les sédiments vers une fosse externe dont ils sont extraits à sec par une vis ou par un rateau alternatif (figure 273).

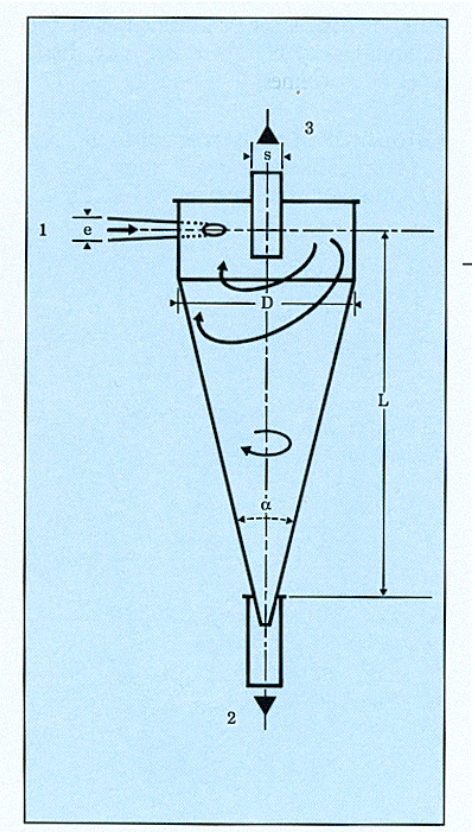
2.5. HYDROCYCLONES

Ces appareils assurent la séparation de particules par classification hydraulique centrifuge. Ils sont constitués d'une enceinte cylindro-conique dans laquelle l'alimentation tangentielle met l'eau en rotation avant sa sortie par une tubulure axiale de surverse (figure 274).

Les boues concentrées sont évacuées par la pointe (sousverse). L'accélération centrifuge atteinte dans les plus petits appareils peut dépasser 600 g et la pression d'alimentation varie de 0,5 à 2 bars. La caractéristique de séparation d_{50} exprimée en général en µm et improprement appelée pouvoir de coupure, correspond au diamètre de particule pour lequel on a 50 % de séparation.

La construction est caractérisée par le diamètre D de l'enceinte, le rapport longueur L/diamètre D, les diamètres e de l'orifice d'entrée et s de l'orifice de sortie, et l'angle au sommet a.

Différentes relations ont été étudiées pour caractériser un cyclone en fonction de ses proportions et, selon RIETEMA, un nombre caractéristique dépendant des seules dimensions géométriques est



1. Entrée.
2. Sousverse (sable).
3. Surverse (sortie).

Figure 274. Hydrocyclone.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

$$Cy_{50} = \frac{d^2_{50}\,\Delta\varrho}{\eta\varrho} \cdot \frac{L\Delta p}{q} = \text{constante}$$

dans laquelle :

g : masse volumique de l'eau.

Δg : différence de masse volumique entre les particules solides et l'eau.

Δp : pression différentielle dans l'appareil.

η : viscosité dynamique.

q : débit de l'appareil.

On établit expérimentalement la variation de pression différentielle Δp en fonction du débit traversant. Deux familles d'appareils sont utilisées.

. Hydrocyclones simples monotubulaires

Leurs diamètres varient de 150 à 800 mm pour traiter des débits de 20 à 250 $m^3.h^{-1}$ avec des d_{50} de 50 à 80 µm. Ils sont protégés contre l'abrasion et mis en oeuvre sur des suspensions concentrées de boues, voire des eaux peu chargées, si le pouvoir de coupure peut être élevé.

- **Hydrocyclones multitubulaires**

Pour traiter des débits plus élevés et en dessablage d'eaux peu chargées, on peut utiliser des cyclones de très petit diamètre, groupés en parallèle en une même enceinte, avec possibilité d'atteindre un d_{50} plus faible (10 µm). Ils présentent des diamètres de quelques centimètres et sont construits en matériaux plastiques anti-abrasion. La perte de charge est comprise entre 1 et 2 bars. Leur alimentation doit se faire après un tamisage approprié.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. DÉBOURBAGE

3.1. DOMAINE D'APPLICATION

Le débourbage est une étape de séparation solide-liquide qui précède la clarification des eaux de surface particulièrement chargées lorsque la décantation classique en un seul étage n'est plus possible. Le but de cette prédécantation est d'éliminer la majorité des matières en suspension de l'eau brute, d'en assurer l'évacuation sous forme de boues concentrées et de fournir à l'étape de décantation principale une eau de qualité acceptable. Le seuil de concentration en matières en suspension à partir duquel le débourbage devient nécessaire, dépend du type de décanteur principal :

- 1,5 à 2 $g.l^{-1}$ pour les décanteurs non raclés ou à lit de boue,
- 5 $g.l^{-1}$ pour les décanteurs raclés.

Situé après un éventuel dessablage, le débourbage associe deux phases de séparation solide-liquide, la décantation en piston et l'épaississement des boues, dont l'importance relative dépend de la teneur de l'eau brute en matières en suspension, de leur nature et du traitement envisagé.

L'étape de débourbage est généralement conçue pour éliminer les pointes occasionnelles de matières en suspension jusqu'à environ 30 $g.l^{-1}$. En dehors de ces périodes de crue, le débourbeur peut être by-passé. Au-delà de 30 $g.1^{-1}$, le même ouvrage peut toujours être utilisé, mais à des débits moindres; le débit d'évacuation des boues représente alors une part considérable du débit entrant.

Il n'est pas rationnel, en général, de concevoir de débourbage pour des eaux avec MES > 50 $g.l^{-1}$; l'isolement de la station est souvent préférable pour éviter toute détérioration des ouvrages. Une réserve d'eau brute peut être constituée en amont de la station.

3.2. MISE EN OEUVRE

Afin d'améliorer la qualité de l'eau prédécantée et d'accroître les performances hydrauliques du débourbeur, l'utilisation de réactifs chimiques coagulants et/ou floculants est généralement requise.

Sans réactif chimique, la vitesse appliquée sur l'ouvrage doit être inférieure à la vitesse de décantation naturelle des matières en suspension de l'effluent, elle même dépendante de la nature et de la concentration de ces matières (0,5 à 1 $m.h^{-1}$ environ).

Avec un coagulant minéral seul, une fraction de la phase colloïdale est éliminée. Le chlorure ferrique permet souvent d'atteindre une vitesse de décantation (1,5 à 3 m.h-1 environ) supérieure à celle obtenue avec le sulfate d'aluminium (1 à 2 $m.h^{-1}$ environ). Les sels d'alumium produisent en outre des volumes de boue très importants. Le taux de traitement à appliquer est de l'ordre du tiers du taux nécessaire à une coagulation-floculation opti

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

male. Ces coagulants minéraux ne doivent être mis en œuvre que sur des eaux ayant des MES nettement inférieures à 30 $g.l^{-1}$.

Avec un floculant organique seul, la vitesse de décantation est considérablement augmentée; la fraction colloïdale peut également être réduite si le polymère est bien choisi. Cette solution, préférable aux précédentes, donne un floc très compact et des boues particulièrement concentrées (plus de 100 $g.1^{-1}$). Pour un taux de traitement de 1 $g.m^{-3}$ en produit actif, les vitesses applicables peuvent atteindre

- 3 à 5 $m.h^{-1}$ pour une eau brute à 3 0 $g.l^{-1}$ en MES,
- 8 à 10 $m.h^{-1}$ pour une eau brute à 10 $g.1^{-1}$ en MES.

L'emploi simultané d'un coagulant minéral et d'un floculant organique peut être envisagé dans certains cas. Avec un coagulant organique seul, les performances sont souvent inférieures à celles d'un floculant organique seul.

La nécessité et le dimensionnement d'un débourbage sont souvent difficiles à déterminer. Quatre facteurs essentiels sont à considérer

- nature et concentration des particules (sables fins, limons, argiles, colloïdes...),
- amplitude et fréquence des crues,
- nécessité de maintenir la production,
- coût d'exploitation: réactifs, main-d'œuvre.

Les débourbeurs sont de forme rectangulaire (ponts suceurs, racleur à chaîne) ou circulaire (racleur diamétral). Leurs techniques de construction se rapprochent de celles des décanteurs (chapitre 10, §4). Ils doivent être précédés d'un mélangeur rapide pour l'ajout des réactifs et parfois même d'un floculateur. L'extraction des boues par pompes est fortement recommandée, du fait de la concentration et de la grande quantité de boues à évacuer.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 275. Décanteur circulaire raclé de debourbage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. DÉGRAISSAGE ET DÉSHUILAGE

4.1. PRODUITS A SÉPARER

Les opérations de dégraissage et de déshuilage consistent en une séparation de produits de densité légèrement inférieure à l'eau, par effet de flottation, naturelle ou assistée (chapitre 3, § 4.1.1), dans une enceinte liquide de volume suffisant.

Les graisses sont des produits solides (à condition qu'une température suffisamment basse autorise le figeage) de nature essentiellement animale (ou végétale), présents dans les ERU et dans certaines ERI (agro-alimentaire), et en faible quantité sur les bassins de pluie, lagunes, étangs, etc. Le produit se présente sous la forme de particules libres, ou plutôt agglomérées avec des matières en suspension diverses (qu'il faut détacher pour autoriser la flottation). La technique de séparation utilisée conduit à récupérer, en même temps que les graisses proprement dites, certains produits flottants tels que débris divers végétaux ou animaux (abattoirs), savons, mousses (détergents), élastomères et plastiques, etc.

Le **dégraissage** est une opération de séparation liquide-solide réalisant un compromis entre une rétention maximale des graisses et un dépôt minimal de boues de fond fermentescibles. Son rendement est difficile à définir par suite des difficultés d'échantillonnage et d'analyse.

On a coutume d'appeler "huiles" des produits liquides aussi différents que les huiles végétales, les huiles minérales, les hydrocarbures légers. Si elles sont présentes à l'état de traces (eaux de surface, condensats de réchauffage de réservoirs de produits pétroliers), leur séparation se fait alors par adsorption, filtration. Le terme **déshuilage** est habituellement réservé à l'élimination d'huiles présentes en quantité notable dans les ERI, en particulier dans les industries du pétrole (mais normalement absentes des ERU, leur rejet en égoût étant interdit).

Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide.

4.2. DÉGRAISSEURS

4.2.1. Conditions d'utilisation

4.2.1.1. Dégraissage des ERU avant rejet à l'égout

Ce prétraitement "à la source" est recommandé, et souvent imposé, à de nombreuses entreprises artisanales, restaurants, collectivités, etc. Des séparateurs de graisse (ou boîtes à graisse) standardisés sont fabriqués en série pour des débits allant jusqu'à 20 à 30 $l.s^{-1}$. Ces appareils sont calculés pour un temps de séjour de 3 à 5 min et une vitesse ascensionnelle de sédimentation de 15 $m.h^{-1}$ environ.

Bien exploités, ils peuvent retenir jusqu'à 80 % environ des matières grasses figées et stocker de l'ordre de 40 1 de matières légères par $l.s^{-1}$ de débit introduit. Un curage régulier est indispensable. La température des eaux doit être

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

inférieure à 3 0 °C à la sortie de l'appareil. Ces appareils sont conçus pour éviter, autant que possible, les dépôts de matières lourdes, mais on peut avoir avantage à prévoir, en amont, un bac de décantation des matières les, plus grosses, offrant un temps de séjour de l'ordre de 1 à 3 min, et facilement curable.

4.2.1.2. Dégraissage en prétraitement de station d'épuration d'eaux résiduaires

Un décanteur primaire sépare obligatoirement les graisses qui se sédimentent en surface, mais est en général mal adapté à la reprise de celles-ci dès que leur volume devient important, et il s'ensuit des difficultés d'exploitation.

Pour des eaux résiduaires d'origine domestique, le dégraissage est indispensable si il n'y a pas de décantation primaire; il est avantageusement effectué en combinaison avec le dessablage pour autant que les dimensions de l'ouvrage soient calculées en conséquence (temps de séjour environ 15 min) et qu'un moyen soit prévu pour séparer les matières organiques décantées avec le sable.

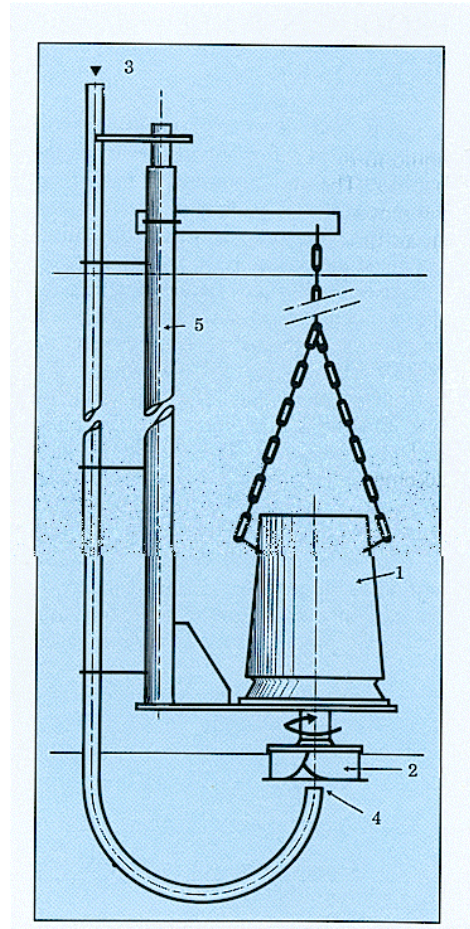
Pour certaines eaux usées des IAA contenant des quantités importantes de graisses à retenir (en particulier abattoirs, industries de la viande), un dégraisseur séparé, calculé pour une charge hydraulique de 10 à 20 $m^3.h^{-1}$ par m^2 de surface utile, peut être recommandé. Placé avant rejet à l'égoût, il réalise alors une protection du réseau.

Ces ouvrages ne sont pas conçus pour retenir les huiles et hydrocarbures qui sont, le cas échéant, arrêtés en décantation primaire.

4.2.2. Dessableur-dégraisseur circulaire

De forme cylindro-conique, l'ouvrage a un diamètre de 3 à 8 m et une profondeur liquide au centre de 3 à 5 m. Il est équipé d'un aérateur-mélangeur immergé TURBOFLOT placé dans l'axe.

Le mélangeur-aérateur TURBOFLOT (figure 276), comporte un mobile centrifuge de pompage, noyé sous environ 2 m



1. Moteur immergé. 2. Roue centrifuge. 3. Aspiration d'air. 4. Entrée d'air. 5. Support

Figure 276. Schéma du mêlangeur-aérateur TURBOFLOT

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

d'eau et entraîné par un moteur électrique immergé libérant une puissance spécifique de 15 à 3 0 W par m^3 de capacité liquide; le mobile

- assure un flux d'écoulement giratoire dans les zones basses de l'ouvrage,
- crée une zone de turbulence ponctuelle favorisant la séparation des graisses et des matières agglutinées,
- aspire un certain débit d'air atmosphérique par une conduite à l'air libre, et libère cet air dans la masse sous forme de très fines bulles dispersées. Cet air provoque un lent mouvement de giration de la masse liquide par effet d'émulseur à air, et favorise le rassemblement des graisses et écumes en surface.

L'eau est introduite tangentiellement dans un déflecteur cylindrique central noyé entourant le TURBOFLOT et est reprise à travers un orifice immergé de la paroi cylindrique.

La partie conique inférieure de l'ouvrage forme une trémie inclinée à 45 ° environ. Le glissement des sables décantés sur cette pente vers le point de reprise en fond d'ouvrage est facilité par une vitesse de balayage supérieure à 0,15 $m.s^{-1}$, obtenue grâce à l'action du mélangeur.

Le sable collecté en fond de trémie est extrait par un émulseur à air, après avoir été séparé des matières organiques décantées, par brassage directement dans l'ouvrage (insufflation d'air par le pied de l'émulseur à air); l'émulsion est envoyée dans un compartiment d'essorage gravitaire ou vers un système de récupération mécanique.

Les graisses flottées en surface sont reprises en continu par un ensemble de raclage rotatif à vitesse lente; les graisses raclées sont essorées par poussée sur un plan incliné à déversoir émergé et chutent dans une goulotte de collecte. Elles s'évacuent généralement gravitairement dans une benne de stockage.

Figure 277. Dessableur-dégraisseur circulaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2.3. Dessableur-dégraisseur rectangulaire

Les ouvrages dont la largeur peut aller de 4 m (ouvrage simple) à 8 m (ouvrage double), ont une profondeur liquide d'environ 4 m et une longueur maximale d'environ 30 m. Ils permettent de traiter des débits importants (figures 278 et 279).

La section transversale de l'ouvrage présente une forme adaptée à l'écoulement des flux transversaux de balayage, avec pentes facilitant la confluence du sable en fond d'ouvrage. L'eau, introduite en tête d'ouvrage, est reprise à l'autre extrémité, à travers un large orifice immergé de la paroi, avec passage sur un déversoir aval de maintien de niveau du plan d'eau.

L'ouvrage, à flux longitudinal lent, est généralement équipé de deux systèmes associés de brassage et aération, créant des flux giratoires transversaux indépendants du débit d'eau, et autorisant de ce fait de grandes variations de la vitesse de transit longitudinale, qui peut être très faible sans inconvénient :

- une zone d'entrée éventuelle de pré-dessablage (pouvant atteindre jusqu'à 1/3 de la longueur de l'ouvrage), comporte un système d'insufflation d'air en ligne, équipé de diffuseurs d'air adaptés tels que VIBRAIR, qui délivre une puissance spécifique d'aération de l'ordre de 20 à 30 $W.m^{-3}$.. L'air insufflé maintient une vitesse de circulation transversale, favorise par son effet de turbulence la séparation des matières organiques agglutinées aux particules de sable, et évite une accumulation massive de gros sables en tête d'ouvrage.
- le reste de l'ouvrage, consacré au dégraissage et au dessablage fin, comporte une série de TURBOFLOT disposés en ligne, qui assure un flux giratoire plus lent et la flottation des graisses.

L'extraction du sable est réalisée automatiquement par un pont mobile alternatif à séquences programmées

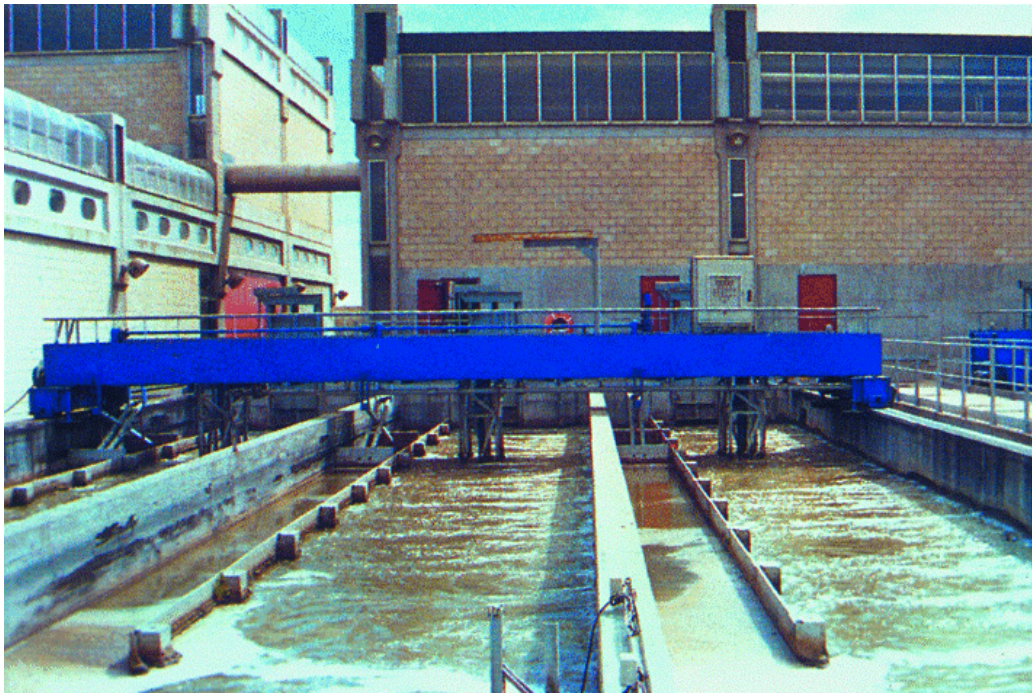


Figure 278. Dessableur-dégraisseur rectangulaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- soit par raclage vers une fosse de collecte d'extrémité, suivi d'une reprise par pompe ou émulseur à air fixe,

- soit par pompe suceuse ou émulseur à air, monté sur le pont-mobile, et déversant le sable dilué dans une goulotte d'évacuation latérale.

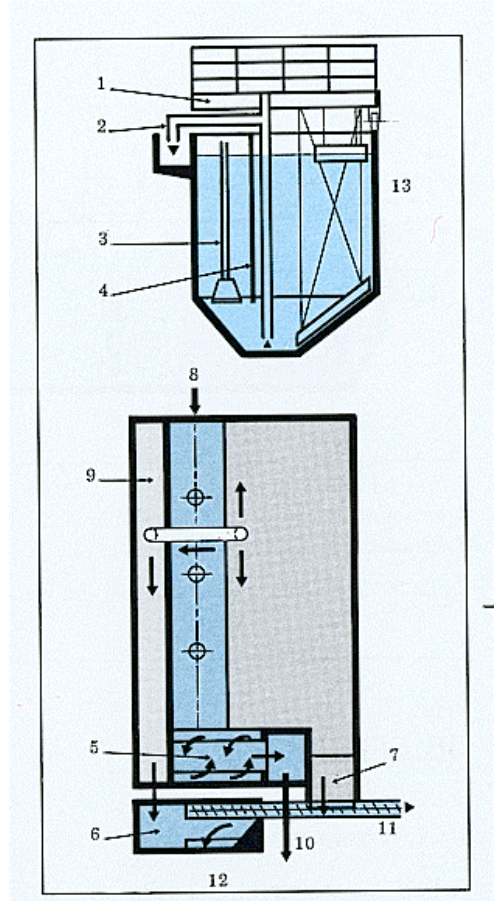
Les graisses flottées en surface sont raclées vers l'extrémité de l'ouvrage par le pont-mobile, et extraites selon une séquence programmée

- soit par poussée sur un plan incliné à déversoir émergé: voie "sèche" - récupération immédiate en fosse ou en benne mobile,

- soit par vanne-déversoir (motorisée et programmée): voie "humide" -transport hydraulique vers un ouvrage de séparation annexe (voir § 6.3).

4.2.4. Dégraisseur rectangulaire avec aérateur-mélangeurs en tête

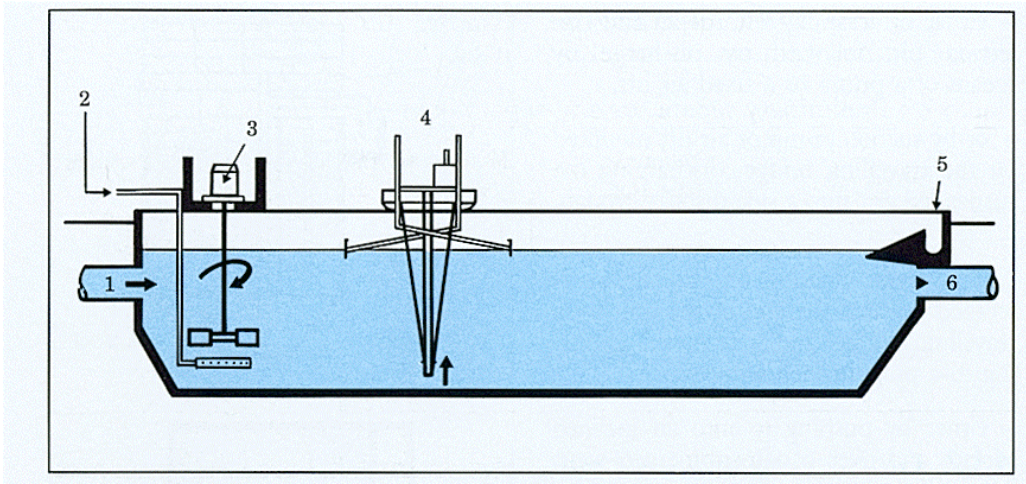
Une variante de l'ouvrage précédent est parfois justifiée (pour des eaux contenant peu de gros sables), avec seulement un ou deux aérateurs-mélangeurs placés entête (figure 280) ; les appareils peuvent être du type VORTIMIX D qui comporte une hélice immergée à axe vertical, sous laquelle est injecté un débit d'air surpressé réglable, au moyen d'un diffuseur approprié. Cet aérateur-mélangeur, destiné à de grands ouvrages, réalise les mêmes fonctions que le TURBOFLOT avec la possibilité d'une adaptation séparée du brassage et de l'aération.



1. Ensemble pont, passerelle, raclage.
2. Ensemble de reprise des sables par béduwé.
3. Aérateurs mécaniques TURBOFLOT.
4. Cloisons siphoides.
5. Ensemble de reprise d'eau traitée.
6. Extraction des sables et des graisses.
7. Ensemble de reprise des graisses.
8. Arrivée des eaux dégrillées.
9. Goulotte de collecte des sables.
10. Sortie des eaux traitées.
11. Sortie des graisses et des sables.
12. Sortie surverse.
13. Racleur suspendu.

Figure 279. Schéma d'un dessableur-dégraisseur rectangulaire avec TURBOFLOT en ligne.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1-Arrivée d'eau dégrillée.
2-Alimentation en air surpressé.
3 -VORTIMIX.
4 -Pont suceur et écrémeur.
5-Reprise des graisses.
6 -Sortie d'eau traitée

Figure 280. Schéma d'un dégraisseur avec VORTIMIX en tête.

4.3. DÉSHUILEURS

4.3.1. Conditions d'utilisation

Deux types d'effluents industriels sont concernés :

- régulièrement huileux (production et raffinage du pétrole, huileries alimentaires, laminoirs à froid, aéroports),
- peu huileux, mais avec des pointes accidentelles fortes de débit (eaux d'orage des raffineries, condensats de réchauffage de stockages, centrales thermiques à fioul, laminoirs à chaud).

Les huiles ou les hydrocarbures sont présents

- soit à l'état libre,
- soit à **l'état d'émulsions mécaniques** fines mais instables, plus ou moins adsorbées sur des matières en suspension.
- soit encore, moins fréquemment, à **l'état d'émulsions chimiques** (exemple fluides de coupe aqueux).

Le déshuilage par gravité ne concerne que les deux premiers états et dépend de

- la masse volumique des huiles, variant en général de 0,7 à 0,95, mais pouvant dépasser 1 avec certains hydrocarbures lourds,
- la température dont l'élévation est toujours favorable à la séparation,
- la viscosité dynamique des huiles, qui peut varier de quelques centièmes de Pa.s à plus de 0,2, valeur limitante pour certains procédés,
- la valeur du point de figeage.

Le déshuilage de ces différents effluents comporte un ou deux stades

- prédéshuilage, ou élimination des hydrocarbures flottants, qui peut être combiné à leur dessablage,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- déshuilage qui, selon les finalités recherchées, élimine plus ou moins complètement les hydrocarbures dispersés (tableau 74)

Tableau 74. Prédéshuileurs et déshuileurs

Alimentation	Prédéshuileurs	Déshuileurs moyens (à 40-50 $mg.l^{-1}$ HC)	Déshuileur de finition (à 5-20 mgl^{-1})
Sous pression	Séparateurs fermés	Cyclones	Filtres coalesceurs Filtres granulaires
Gravité	• type API • à plaques parallèles • circulaire	Flottateurs mécaniques	Flottateurs air dissous

4.3.2. Prédéshuileurs gravitaires

Le rendement des ouvrages de prédéshuilage, généralement utilisés sans réactif, ne peut être quantifié

- la densité de l'hydrocarbure et la répartition granulométrique des gouttelettes dans l'eau sont rarement connues,

- la nature de l'émulsion est mal définie, -l'échantillonnage en amont est pratiquement impossible.

Ces appareils éliminent les afflux massifs et irréguliers d'huiles, puis les gouttelettes les plus

volumineuses. Ils sont de trois types

- **séparateurs longitudinaux**, (API) calculés suivant une norme de l'American Petroleum Institute (séparation des gouttelettes de plus de 150 µm de diamètre), ils présentent des largeurs de 1,8 à 6 m et des profondeurs d'eau de 0,6 à 2,4 m.

Ces appareils sont difficiles à couvrir (réduction des risques d'odeur) et l'extraction des boues de fond y est malaisée.

- **séparateurs lamellaires:** l'application de la décantation lamellaire avec des plaques en matériau plastique espacées d'environ 4 cm (figure 281) a conduit de réduire les temps de séjour de quelques heures à moins de 60 minutes sinon 30. Ces appareils demandent un certain entretien; il est souhaitable de les utiliser sur des eaux relativement chaudes (figeage à éviter) et pauvres en matières en suspension (raclage de fond coûteux).

Leur construction étant modulaire, le traitement de débits élevés requiert un nombre important de modules (acceptant chacun de 15 à 30 M^3 h^{-1}) avec des ouvrages de répartition difficiles à couvrir et à écrémer.

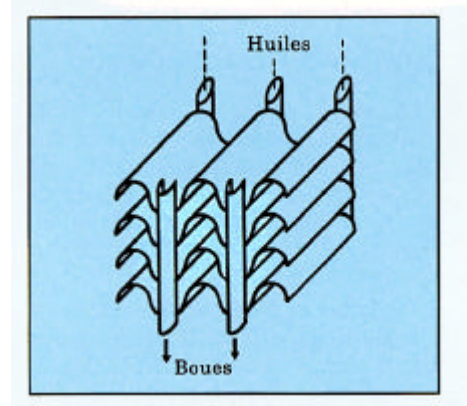
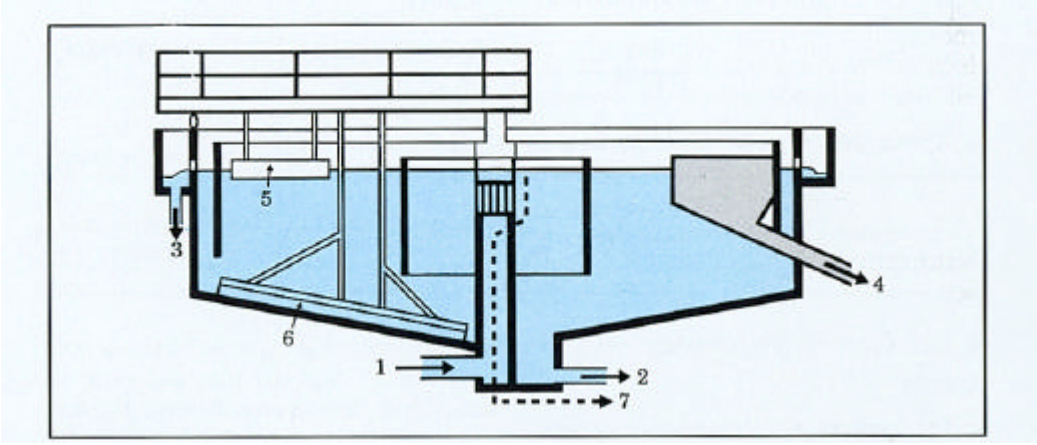


Figure 281. Modules lamellaires de déshuilage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- .**séparateurs circulaires**: ils assurent une séparation en deux chambres successives (figure 282) : la première, couverte, évitant le dégazage des produits légers et volatils, la seconde étant raclée sur le fond et en surface.



1 - Arrivée d'eau brute.
2 - Sortie des boues.
3 - Sortie de l'eau traitée.
4 - Sortie des huiles lourdes.
5 - Raclage de surface.
6 -Raclage de fond.
7 - Reprise des huiles légères à l'abri de l'atmosphère

Figure 282. Schéma d'un déshuileur circulaire.

4.4. RÉCUPÉRATEURS D'HUILE ET FLOTTANTS POUR BASSINS OU LAGUNES

La collecte des nappes d'huiles (et/ou de flottants) rassemblées à la surface d'un plan d'eau tranquille peut être effectuée à partir d'appareils appelés récupérateurs, qui n'ont aucune action épuratrice sur l'eau sous-jacente. On peut en distinguer quatre familles

- **Goulottes et déversoirs orientables**

Montés fixes (ou flottants dans le cas d'un niveau variable), ils nécessitent un dispositif annexe d'approche de la nappe d'huile et entrainent une grande quantité d'eau.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 283. Le RADEG.

- **Collecteurs oléophiles à tambour ou à bande**

Leur avantage principal est de récupérer une huile très pauvre en eau et, dans le cas des bandes, de tolérer une grande variation du niveau d'eau. Pour les grandes surfaces, ils doivent aussi être assistés d'un raclage de nappe.

- **Récupérateurs mécaniques fixes**

La nappe d'huile est véhiculée sur une grande distance vers la zone de collecte, par un courant d'eau créé par un mobile de pompage.

- **Récupérateurs mobiles**

Ces appareils flottants, autonomes ou tractés, permettent l'entretien de grands plans d'eau (bassins de pluie, lagunes). Ils reprennent un grand débit d'eau qui est ensuite cycloné ou décanté.

Le RADEG permet ainsi la reprise non seulement des huiles et graisses, mais aussi, grâce à son broyeur, celle des papiers, chiffons et autres flottants qui encombrent fréquemment les plans d'eau.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. TAMISAGE

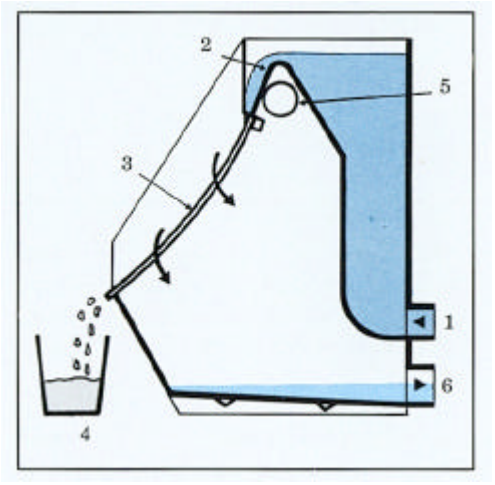
5.1 TAMIS POUR EAUX RÉSIDUAIRES

Outre les grilles mécaniques à fentes fines à espacements de 3 mm ou 6 mm, nécessaires dans certaines chaînes d'épuration d'effluents urbains, il peut être utile de disposer de tamis à orifices plus étroits. Tel est le cas de certaines IAA dans lesquelles le tamisage peut aussi s'accompagner de l'élimination d'une partie significative de la pollution en suspension et, éventuellement, de sa revalorisation.

Les équipements utiles de ces tamis sont constitués par des tôles perforées, ou le plus souvent, par des éléments de grille type Johnson. Les espacements varient de 0,5 mm (voire 0,25 mm) à 2 mm. On distingue .

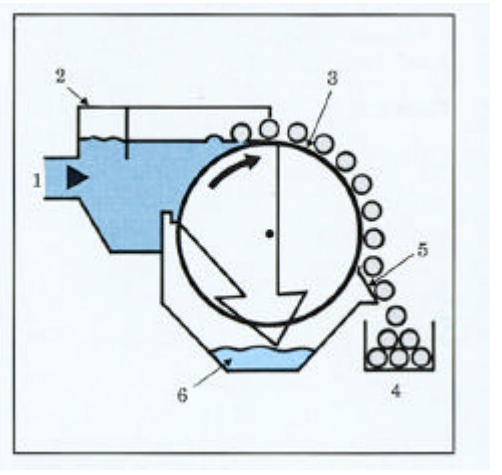
- des grilles verticales concaves à autonettoyage assisté (figure 284) et de capacité limitée à 100-200 $m^3.h^{-1}$. L'eau brute étant distribuée suivant un rideau d'eau vertical, les particules retenues sont entraînées hydrauliquement vers un réceptacle inférieur,
- . des tambours rotatifs dont la capacité peut aller jusqu'à 1500 $m^3.h^{-1}$:

- dans certains appareils, la plupart des matières retenues à l'extérieur du tambour



1-Arrivée d'eau brute.
2 -Volet repartiteur.
3 -Grille. 4 -Refus.
5-Lunette d'observation.
6 - Sortie d'eau tamisée.

Figure 284. Schéma d'un tamis à grille concave (autonettoyage assisté).



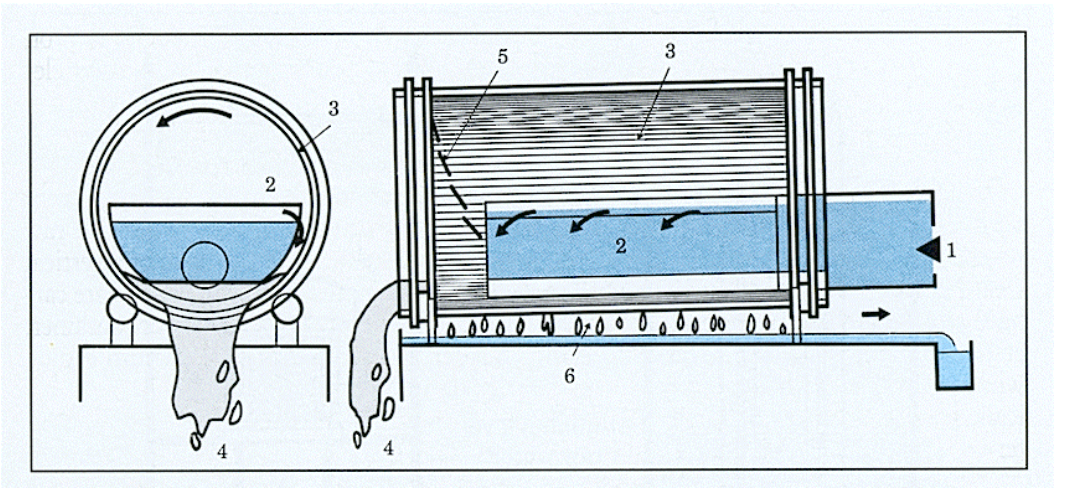
1-Arrivée d'eau brute.
2 -Boite d'alimentation.
3 -Tamis. 4 -Refus.
5-Lame de raclage.
6 - Sortie d'eau tamisée.

*Figure 285. Schéma d'un tamis rotatif à alimenta*tion extérieure et nettoyage mécanique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sont évacuées par raclage, les autres étant entraînées dans l'eau tamisée qui traverse le tamis à contresens (figure 285),

- dans d'autres appareils (figure 286), les matières retenues à l'intérieur du tambour sont évacuées grâce à sa pente, le nettoyage étant assuré par une pulvérisation d'eau toujours à contresens.



1-Arrivée d'eau brute.
2 - Goulotte de répartition.
3-Tamis cylindrique.
4 -Refus.
5-Guides pour refus.
6 - Sortie d'eau tamisée.

Figure 286. Schéma d'un tamis rotatif à alimentation intérieure et nettoyage par pulvérisation (Contrashear).

5.2. TAMIS POUR EAUX DE SURFACE

5.2.1. Macrotamisage

Les éléments filtrants sont constitués de tôles perforées ou, le plus souvent, de toiles à mailles croisées en acier inoxydable ou en tissu synthétique, présentant des ouvertures de 0,15 à 2 mm.

Les tamis sont réalisables sous forme de tambours de 1,5 à 6 m de diamètre ou de bandes de 1 à 3 m de largeur et dont la hauteur de 3 à 15 m est adaptée aux rivières à niveau variable (figure 287).

Selon le sens de circulation de l'eau, le système de lavage par pulvérisation est situé au-dessus du filtre ou à l'intérieur. Une goulotte évacue les effluents de lavage.

Dans les deux cas, la mise en place de panneaux en forme de dièdres ou de demi-cylindres permet d'accroître la surface spécifique de filtration (chapitre 3, figures 32 et 33). La capacité de ces appareils peut aller jusqu'à plusieurs milliers de $m^3.h^{-1}$.

5.2.2. Microtamisage

Les toiles filtrantes, en tissu synthétique, ont des ouvertures de mailles de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

30-40,µm à 150 µm. Elles sont montées sur des tambours. Les équipements de lavage doivent assurer une pulvérisation plus intense sur la toile du fait de risques de colmatage accrus par les sables et limons fins. L'étanchéité des joints doit être assurée plus sévèrement. Les capacités de ces appareils sont limitées (figure 2 89).

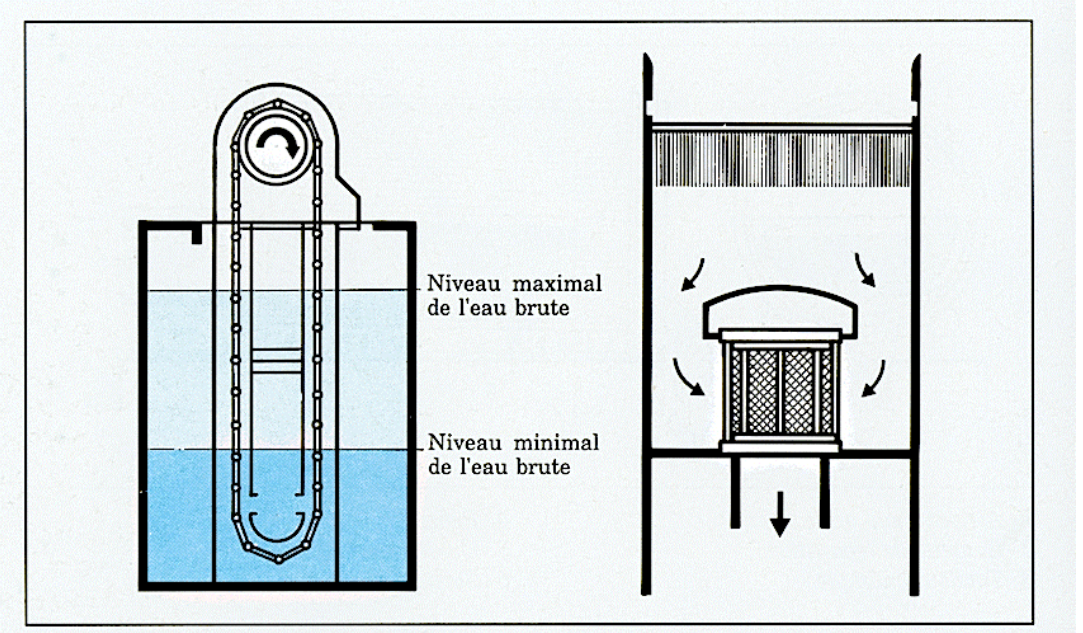


Figure 287. Microtamis à bande.

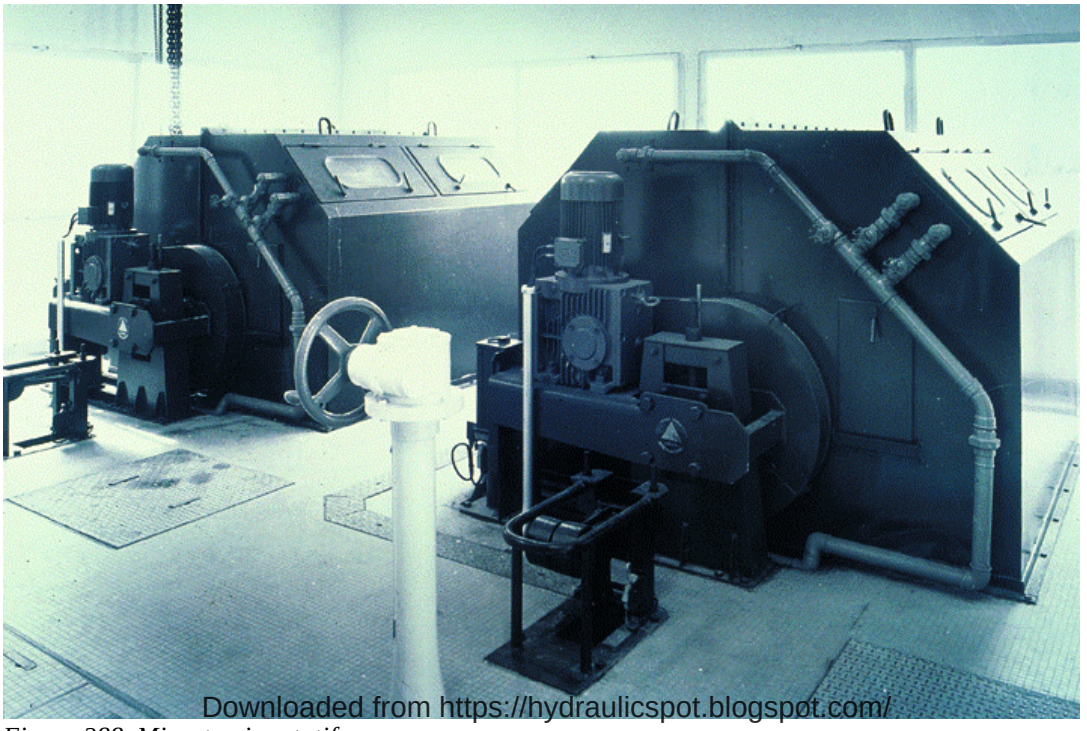
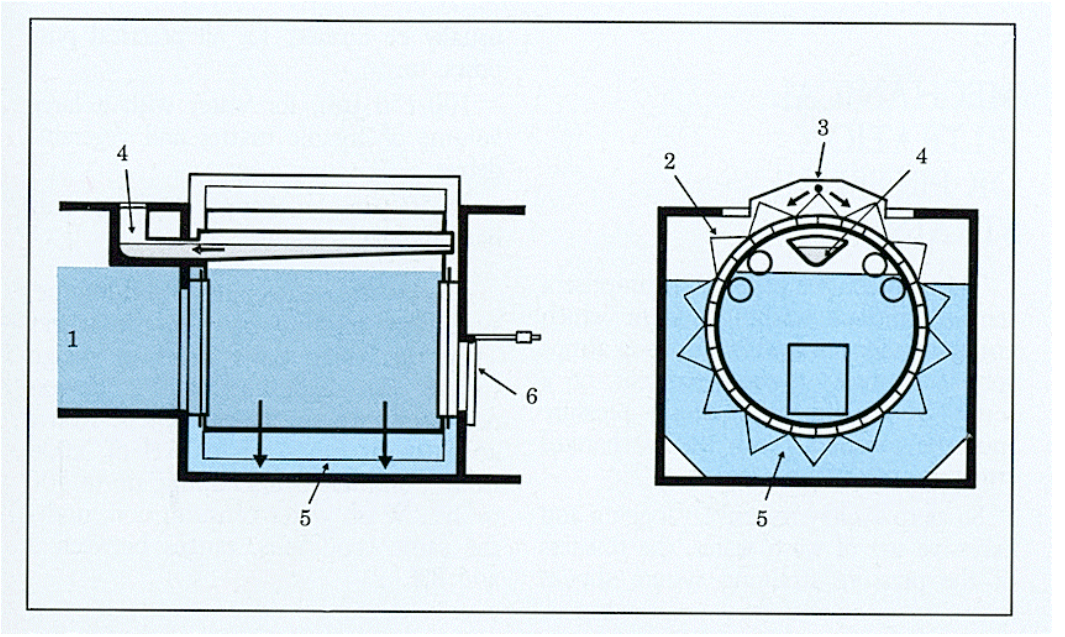

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 288. Microtamis rotatif



1-Arrivée d'eau brute.
2 - Tamis.
3 -Eau de lavage.
4-Goulotte de départ des eaux de lavage.
5-Sortie d'eau tamisée.
6 - Clapet de sécurité.

Figure 289. Microtamis à tambour

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

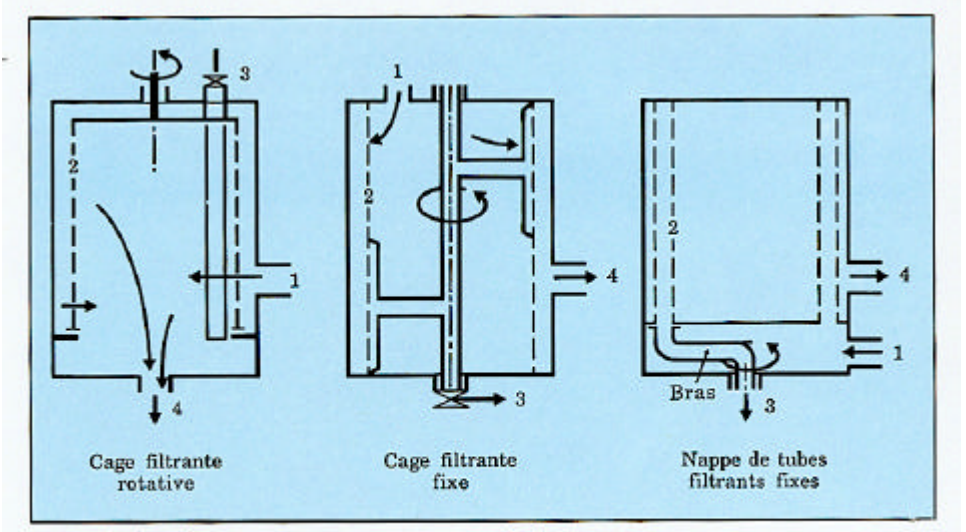
5.3. FILTRATION MÉCANIQUE OU TAMISAGE SOUS PRESSION

Ces filtres (voir page 182) comportent un système de lavage semi- continu qui assure l'évacuation des boues, par simple mise à la pression atmosphérique, en contre-courant sur un secteur de filtre. La pression de lavage doit être adaptée à la résistance mécanique de la toile.

Pour éviter des colmatages irréversibles, et des consommations excessives d'eau de lavage, on doit, pratiquement, souvent limiter la finesse du tamisage sous pression

- à 100-150 µm, pour les eaux chargées en matières organiques et débris végétaux,
- à 40-50 µm, si les eaux contiennent seulement des matières minérales dures.

Les fibres sont particulièrement néfastes car elles ont tendance à s'accrocher dans les toiles. Trois types de constructions peuvent être rencontrées (figure 290). Les débits unitaires des appareils décroissent avec la finesse du tamisage. Au-dessus de 250 Mm, ils peuvent aller jusqu'à 5 000 $m3.h^{-1}$ et en microtamisage jusqu'à 500 $m3.h^{-1}$. Les pertes d'eau de lavage varient, dans les mêmes conditions, entre 2 et 8 %.



1 - Entrée d'eau brute.
2 - Tamis.
3 - Boues.
4 - Sortie d'eau tamisée.

Figure 290. Types de filtration mécanique sous pression.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. ÉVACUATION ET TRAITEMENT DES SOUS-PRODUITS

6.1. REFUS DE GRILLES

Ces matières (voir page 76) sont souvent envoyées en décharge ou enterrées. Elles peuvent également être incinérées dans un four prévu à cet effet ou dans un four d'OM. La température de combustion doit être supérieure à 800 °C pour éviter le dégagement d'odeurs. La manipulation des déchets de grille dans l'enceinte de la station s'effectue

- soit manuellement dans les petites installations : panier (perforé ou non), benne roulante, benne mobile;
- soit mécaniquement: tapis transporteur, convoyeur à raclettes à déplacement continu ou alternatif,
- soit hydrauliquement : goulotte alimentée en eau par pompage.

Les sujétions liées au transport et à la protection de l'environnement conduisent de plus en plus à prévoir un traitement par essorage ou compactage, par exemple

- essorage (et transport) par benne mobile genre SITA, à compactage intégré (figure 291) : la teneur en eau est abaissée de 75 à 80 % et la densité apparente des matières compactées dans la benne est de l'ordre de 0,75 à 0,8,
- compactage au moyen d'une presse mécanique ou hydraulique adaptée (figure 292) : le produit compacté peut avoir une teneur en eau de l'ordre de 55 à 65 % et une densité apparente de 0,6 à 0,65.

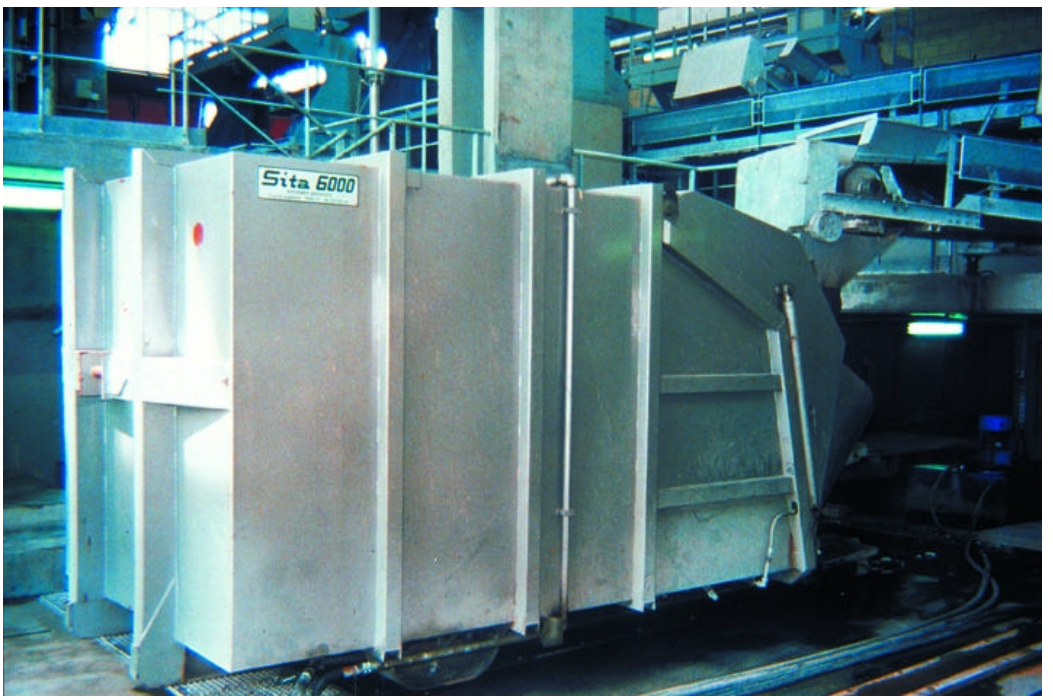


Figure 291 : Benne SITA à chargement hydraulique

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 292. Presse à détritus.

6.2.. SABLES

Le sable (voir page 76) extrait à la pelle des petits dessableurs couloirs est impropre à une réutilisation et doit être enterré ou envoyé en décharge avec les détritus de grille.

Pour les installations moyennes, le sable extrait des dessableurs par voie hydraulique peut être séparé de son eau

- par décantation dans un réceptacle peu profond avec évacuation des eaux par dalles filtrantes ou par déversoir de trop-plein,
- par reprise mécanique (vis d'Archimède ou classificateur à râteaux alternatif) et stockage dans une trémie fixe ou une benne mobile,
- par hydro-cyclonage et stockage en trémie avec déversoir de trop-plein,
- par hydro-cyclonage et reprise par vis d'Archimède avant stockage en trémie fixe ou benne mobile.

Un lavage par eau d'appoint peut également être envisagé sur la vis d'Archimède. Dans les grosses installations, les sables sont parfois lavés avant stockage en trémie, dans un bassin équipé d'un brassage à l'air efficace, recevant le mélange eau et sable pompé dans les dessableurs.

Un sable lavé assez propre peut être réutilisé sur place (constitution de lits de séchage).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 293. Laveur de sable.

6.3.
GRAISSES ET ÉCUMES

Les graisses et écumes recueillies à la surface des dessableurs, dégraisseurs, décanteurs primaires, ne sont généralement pas récupérables. Ces résidus, peuvent éventuellement être introduits en digestion anaérobie (après avoir subi un dégrillage fin au cours de leur transfert hydraulique); cette disposition conduit normalement à l'augmentation de la production de gaz, mais aussi au risque de formation d'un "chapeau" de boue.

Il est préférable de les stocker en benne mobile, éventuellement équipée d'une sortie siphoïde de trop-plein, et de les évacuer périodiquement pour enfouissement ou mise en décharge. Ces produits peuvent également être incinérés avec les boues ou les matières dégrillées si le four et les conditions de manutention le permettent

Figure 294. Collecte des graisses.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Pour de grandes installations, les graisses et écumes des divers ouvrages sont parfois véhiculées par voie hydraulique vers un flottateur statique. Celui-ci est équipé d'un écumeur mécanique à palettes pour la reprise par voie sèche des graisses, alors récupérées dans une benne ou une fosse. Après dégrillage complémentaire et éventuellement réchauffage pour les liquéfier, ces produits sont pompés à débit constant dans un four d'incinération prévu à cet effet ou dans celui du traitement des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

10
FLOCULATION - DÉCANTATION FLOTTATION

1. INJECTION DES RÉACTIFS

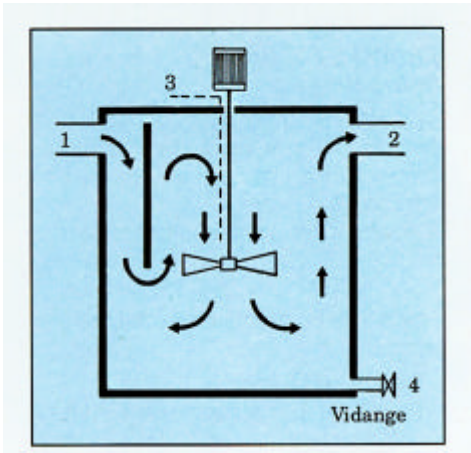
La floculation d'une eau est d'autant meilleure que la phase de coagulation préalable a été plus efficace. A cet effet, la dispersion du réactif doit être quasi instantanée dans un coagulateur, réacteur de mélange rapide où est dépensée une forte énergie. C'est un réacteur à gradient de vitesse élevé (voir page 135). Suivant les technologies, les temps de séjour du liquide varient de quelques secondes à quelques minutes.

1.1 MELANGEURS RAPIDES A HELICES

Cylindriques (acier) ou cubiques(béton), ces appareils sont équipés d'un hélicot-mélangeur à vitesse de rotation élevée (figure 295).Pour des raisons de construction, leur temps de séjour varie de 1 à 3 minutes pour les plus grands. Leur gradient de vitesse est de 250 à 1000 s^{-1} selon les applications.

Le réactif est injecté dans la zone de plus grande turbulence, au-dessus ou au-dessous de l'hélice suivant qu'elle est refoulante ou aspirante.

Dans certaines applications où le gradient de vitesse doit êtrte adapté en fonction des conditions de temperature ou de pollution, l'hélico-mélangeur est équipé d'un variateur de vitesse.



1- Entrée d'eau. 3- Réactif.
2- Sortie d'eau. 4- Vidange
Figure 295. Chambre de mélange avec agitateur rapide.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2. MÉLANGEURS STATIQUES

Les mélangeurs statiques sont des appareils placés directement dans la tuyauterie avant de la phase de floculation.

Ce sont des appareils à gradient de vitesse élevé (2 000 à 30 000 s^{-1}), et à temps de séjour très court (inférieur à la seconde en général). L'énergie dissipée correspond à leur perte de charge, la qualité du mélange dépend de leur conception. Les performances de ces appareils diminuent avec le débit à traiter.

1.2.1. Le RADIALMIX

C'est un mélangeur statique à diffusion radiale hydraulique. Il est constitué d'une buse centrée sur l'axe de la tuyauterie et d'un diaphragme à ouverture périphérique. Des modèles standards existent, pour des tuyauteries de 100 à 400 mm de diamètre. La perte de charge est de 0,2 à 5 m CE suivant les modèles et les cas d'application.

- **RADIALMIX type 1** (figure 296 a)

Ce mélangeur est adapté à l'injection des réactifs minéraux, des polymères, dont le débit q; est faible vis-à-vis du débit à traiter Q.

Il permet d'injecter des solutions concentrées.

$0{,}0005\,\% < q_i < 1\,\%$ de Q

Le réactif est prédilué dans la buse d'injection.

- **RADIALMIX type 2**

Le débit q; de liquide à injecter est un débit important (q_i > 0,5 % de Q). La perte de charge est supérieure à 0,2 m de CE, et est adaptée en fonction des cas d'application. Il y a trois modèles de RADIALMIX type 2.

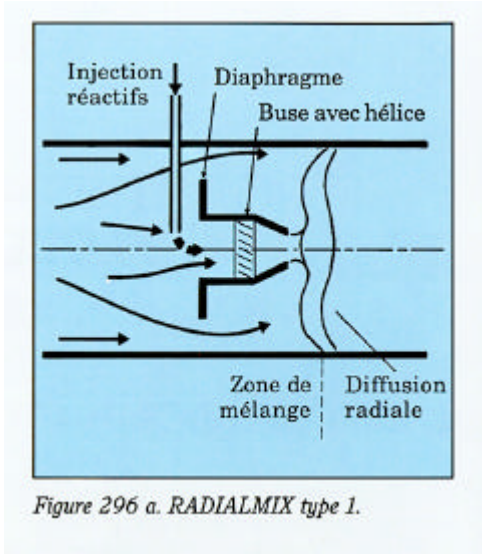


Figure 296 a. RADIALMIX type 1.

- **RADIALMIX 2 M**

Réservé de préférence aux injections dans des liquides chargés. Construction dans une manchette, buse sans hélice.

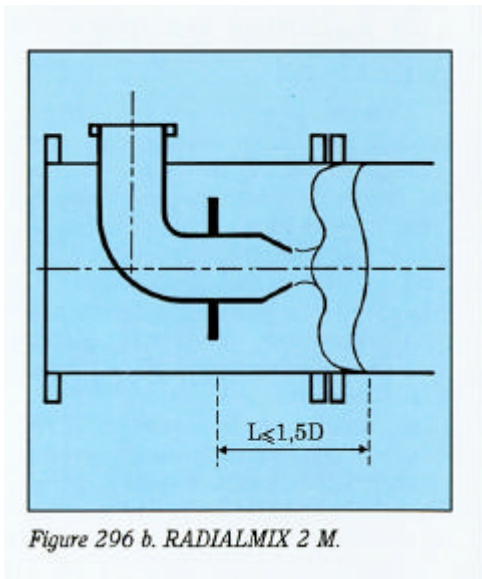


Figure 296 b. RADIALMIX 2 M.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **RADIALMIX 2 MH**

Similaire au RADIALMIX 2 M mais avecbuse à hélice. Ce mélangeur est à proscrire
pour les fluides à mélanger, contenant des filasses ou de grosses particules.

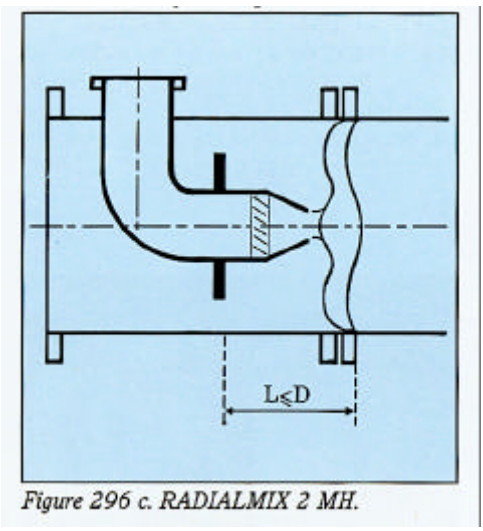


Figure 296 c. RADIALMIX 2 MH.

Modèle compact, réalisé dans un plateau diaphragmé, équipé d'une buse avec hélice.
Spécialement adapté pour les injections de réactifs ou liquides clairs.

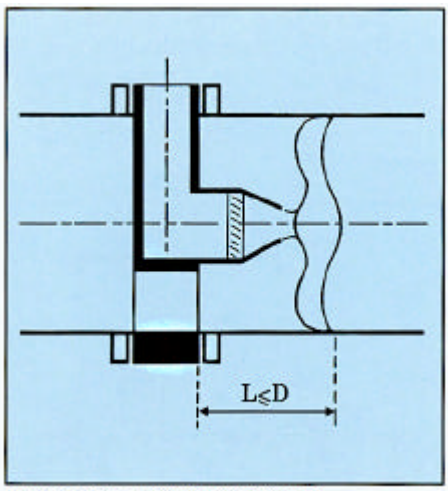
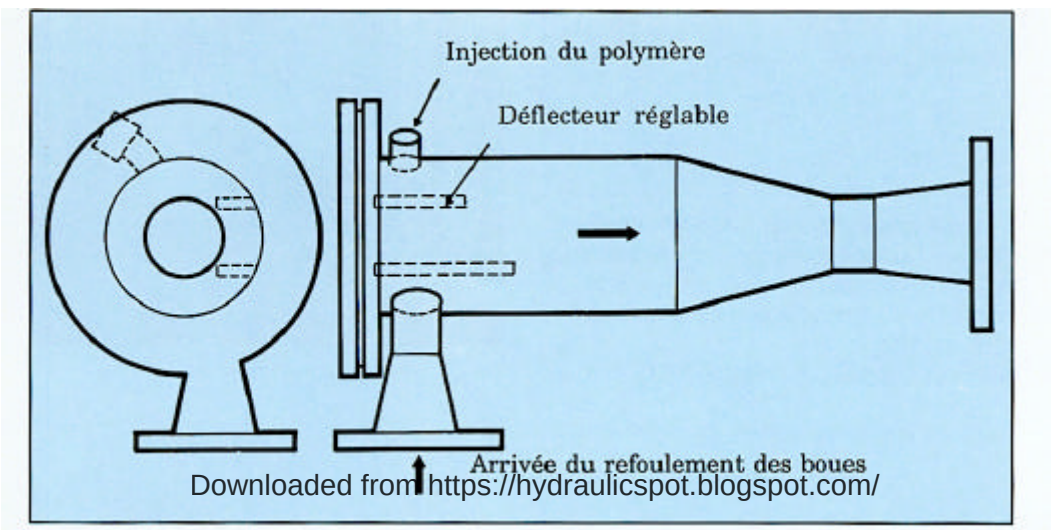


Figure 296 d. RADIALMIX 2 C.

- **RADIALMIX 2** C

1.2.2. Le MSC

Ce mélangeur, de type cyclonique, est adapté au conditionnement des boues (figure 2 9 7). Il comprend une partie cylindrique avec les arrivées de boues et de réactifs, suivie d'une partie conique où le mouvement tournant parfait le mélange. La partie cylindrique comprend 2 déflecteurs réglables.



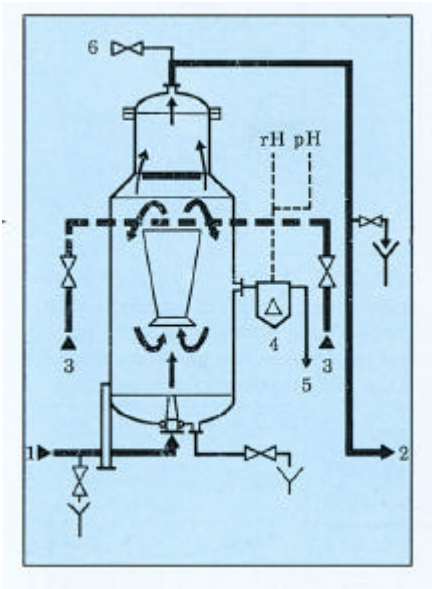
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Fig. 297 Mélangeur MSC.

1.3.
LE TURBACTOR

Le TURBACTOR (figure 298) est un réacteur fermé à mélange rapide sans équipement mécanique, pouvant fonctionner sous pression et qui comprend deux parties

- une zone d'agitation énergique obtenue par des moyens hydrauliques,
- une zone de contact éliminant les courts-circuits.



1-Entrée des effluents bruts. - 2 - Sortie des effluents traités. - 3 -Entrée des réactifs. - 4 –Pot pour sonde pH et rH autorisant la régulation des débits de réactifs. - 5-Recyclage pour mesures rH, pH 6 -Purge d'air.

Figure 298. Schéma du TURBACTOR.

Il peut être équipé d'une régulation de pH et rH, ce qui permet de l'utiliser, non seulement en coagulation, mais aussi en neutralisation ou détoxication. Pour ces applications, le temps de séjour minimal est de deux minutes, et le gradient de vitesse de l'ordre de 600 s^{-1} pour une viscosité du liquide de 1 centipoise.

Il peut être réalisé en matière plastique ou en acier protégé.

Figure 299. Turbacror.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. LES FLOCULATEURS

La floculation est effectuée dans des enceintes, munies de systèmes d'agitation, appelées floculateurs. Suivant les applications ou les fluides à traiter, le système d'agitation, le volume du réacteur et l'énergie dissipée sont différents.

Le floculateur est caractérisé par son gradient de vitesse, son temps de contact, et les vitesses locales extrêmes des mobiles et des fluides, qui créent des forces de cisaillement sur les "flots". Par exemple, les vitesses périphériques des mobiles ne doivent pas dépasser 40 $cm.s^{-1}$ pour un flot d'hydroxyde métallique.

La cuve, le système d'agitation et les équipements annexes, sont conçus pour que l'ensemble des paramètres géométriques permette

- d'éviter les zones mortes (zone de dépôt dans le fond par exemple),
- de récupérer, sous forme de turbulence, l'énergie dissipée (utilisation de déflecteurs périphériques dans les appareils circulaires, par exemple),
- de ne pas avoir de court-circuit entre l'entrée et la sortie du fluide.

Enfin, il importe de ne pas briser le flot lors de son transfert du floculateur à la zone de décantation. Suivant la qualité des eaux traitées, on adopte les vitesses de transfert ci-dessous en clarification d'eau de surface.

- flot d'hydroxyde métallique fragile

$$v \leq 0{,}20\ m.s^{-1}$$

- flot d'hydroxyde métallique résistant

$$v \leq 0{,}50\ m.s^{-1}$$

Il y a deux familles de floculateurs :

- les floculateurs avec un organe mobile d'agitation (Floculateurs agités),
- les floculateurs à chicanes ou statiques.

2.1. FLOCULATEURS AGITÉS

2.1.1. Floculateurs à barrières

Le mobile est constitué d'une série de barrières, montées dans des plans diamétraux décalés régulièrement, et fixées sur un axe horizontal ou vertical (figure 300). L'ensemble est entraîné par un ensemble motoréducteur, avec ou non, un variateur de vitesse. Le mobile peut être entraîné soit par une chaire de transmission, soit directement. Ce dernier système supprime les sujétions liées à la corrosion et à l'entretien des chaînes.

2.1.2. Les floculateurs à hélice

Le mobile est constitué d'une hélice, à arbre vertical, à 3 ou 4 pales, entraînée directement par un ensemble motoréducteur avec, le plus souvent, un variateur de vitesse (figure 301).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.1.3. Mise en oeuvre

Pour améliorer les qualités du flot produit, il est avantageux, pour un temps de floculation donné, de mettre en oeuvre deux floculateurs en série (figure 302). Cette disposition permet

Figure 300. Floculateur à barrières.

- l'adaptation du gradient de vitesse en fonction du temps,
- l'injection décalée ou fractionnée de réactifs,
- la limitation des profondeurs d'ouvrage dans le cas de grands débits.

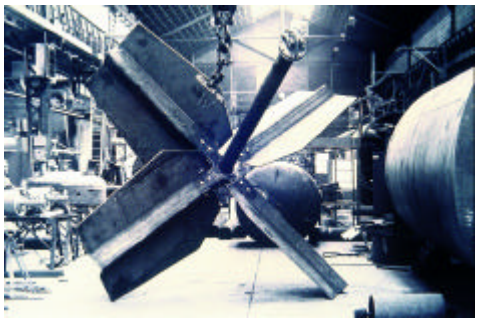


Figure 301. Floculateur à hélice.

Figure 302. Installation L.E. de MOULLE (Pas-de-Calais). Clarification par flottation d'eau de surface. Batterie de 4 floculateurs à double effet. Débit : 4 X 300 $m^3.h^{-1}$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.
LES FLOCULATEURS STATIQUES

Beaucoup moins utilisés que les précédents, ils sont conçus de manière à ce que l'écoulement du fluide à traiter subisse des changements brusques de direction. Les pertes de charge résultantes fournissent l'énergie nécessaire à la floculation. Ce dispositif est réservé aux installations rustiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. LES DÉCANTEURS

La séparation par décantation peut être réalisée de façon discontinue ou continue. Les procédés discontinus, ou décantation par cuvée, ne sont mis en oeuvre que dans des petites installations de fortune ou dans des stations biologiques à cuvées programmées, dans lesquelles les phases d'aération et de décantation sont réalisées dans une même enceinte ("séquence batch reactor"). Dans le cas le plus général, le procédé de décantation est continu

il est mis en oeuvre dans des décanteurs.

Dans un décanteur :

- l'écoulement doit être homogène: équi-répartition de l'eau brute et collecte uniforme de l'eau décantée,
- cet écoulement doit aussi être le moinsturbulent possible: la dissipation d'énergie au niveau de la distribution d'eau, à l'entrée de l'appareil, est à réaliser progressivement,
- l'écoulement, la concentration, l'évacuation des boues constituent une part essentielle du bon fonctionnement de l'appareil et la notion de flux massique, voire volumique, est très importante

$$\text{flux volumique} = \frac{\text{Débit eau x pourcentage boues décantées en un temps donné}}{\text{Surface horizontale de l'ouvrage}}$$

Dans chaque cas le traiteur d'eau doit avoir une connaissance précise des caractéristiques des boues. La multiplicité de situations en traitement d'eau conduit à une très grande variété d'appareils qui sont décrits ci-après.

3.1 DÉCANTEURS STATIQUES

L'usage a consacré le terme "statique" pour désigner les décanteurs qui ne sont ni à circulation de boues ni à lit de boues, bien que, dans ces appareils, la décantation s'effectue en fait selon un processus dynamique.

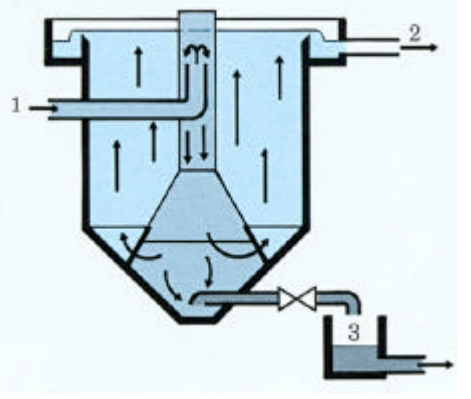
Selon la quantité et la nature des MES de l'eau brute, le volume des précipités à évacuer et la pente du fond de l'ouvrage, le décanteur peut être équipé ou non d'un système de raclage des boues.

3.1.1. Décanteurs simples

3.1.1.1. Décanteurs statiques sans raclage

- **Décanteurs cylindro-coniques ordinaires.**

Ces décanteurs, à flux vertical, sont utilisés pour les installations de petit débit,



1 - Eau brute.
2 - Eau traitée
3 - Vidange.
Figure 303. Décanteur cylindro-conique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

jusqu'à environ 20 $m^3.h^{-1}$, spécialement dans le cas d'épuration par voie physico-chimique. Ils sont également utilisés dans le traitement des ERU pour des populations inférieures à 1000 ou 2 000 habitants.

Ils trouvent leur emploi dans les installations plus importantes, chaque fois que le volume de précipités à décanter est faible et que leur densité est élevée. Ce type de décanteur peut être précédé d'un floculateur, et même d'un dessableur, le cas échéant. La pente de la partie conique de l'appareil est comprise entre 45 et 60°, suivant la nature des boues et le traitement appliqué.

La vitesse ascensionnelle moyenne est de 0,5 $m.h^{-1}$ dans le cas de clarification des EP et de 1 à 2 $m.h^{-1}$ en décantation primaire des ERU.

- **Décanteurs statiques à flux horizontal** Dans ce type de décanteur, utilisé antérieurement pour les EP, la surface de décantation en mètres carrés est égale à 1 ou 2 fois le débit horaire en mètres cubes d'eau à traiter. Cette solution exige de grandes surfaces et un génie civil important. D'autre part, lorsqu'on veut évacuer les dépôts de boue, il faut effectuer périodiquement la vidange totale du bassin. Ce système ne convient donc que lorsque le volume des boues à décanter est faible. Les bassins de décantation statiques sont généralement précédés d'une chambre de mélange où l'on assure une diffusion rapide des réactifs, et d'un floculateur à brassage lent pour favoriser la floculation.

Les décanteurs-couloirs à étages sont une variante des décanteurs statiques à flux horizontal.

3.1.1.2. Décanteurs statiques à raclage mécanique des boues

Un dispositif mécanique de raclage des boues est utilisé dès que la surface de décantation devient supérieure à (30-40 m^2). Il évite de prévoir de fortes pentes de radier, nécessaires à l'écoulement naturel des boues: ces pentes sont alors réduites (jusqu'à 2 % dans le cas des boues légères) et la construction économique de grands ouvrages à profondeur limitée est possible.

Figure 304. Installation de KERKH (Irak). Débit: 1200 000 éq. hab. Ensemble de décanteurs primaires.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le système de raclage permet de conduire les boues dans une ou plusieurs fosses d'où elles sont extraites; le raclage des boues favorise également leur épaississement, qu'il est possible d'améliorer dans certains cas, en prévoyant des fosses de concentration. Les boues sont extraites plus ou moins rapidement par un système automatique d'extraction, suivant la durée de stockage acceptable.

Les décanteurs raclés sont généralement utilisés pour le dégrossissage des eaux de rivière, pour la décantation primaire et la décantation secondaire dans le traitement biologique ou chimique des eaux résiduaires. On les utilise aussi pour la décantation d'effluents industriels chargés: mines, sidérurgie, sucrerie, lavoir de charbon, etc.

- **Décanteurs circulaires**

Les décanteurs circulaires raclés, au-delà d'un diamètre de l'ordre de 10 m, sont à flux essentiellement "horizontal", tant pour les particules en cours de sédimentation qui s'éloignent du centre vers la périphérie (zone de collecte de l'effluent clarifié), que pour les boues sédimentées qui font le chemin inverse. Le système de raclage des boues est plus ou moins élaboré en fonction des applications: il peut être radial ou diamétral, complété ou non par un système d'écumage en surface (couramment utilisé dans le cas des eaux résiduaires).

Dans le cas du **raclage radial,** le racleur de fond est suspendu, au moyen d'articulations, à une charpente formant passerelle et tournant autour de l'axe du bassin; il peut comporter une seule lame ou une série de raclettes montées en jalousie.

Un groupe motoréducteur embarqué, logé à une extrémité, attaque une roue motrice roulant à la périphérie de l'ouvrage - ce qui permet à l'ensemble d'être entraîné en rotation (figures 305 et 306).

Dans le cas du **raclage diamétral,** le racleur est doublé. Il peut être suspendu, de la même manière, à une passerelle

Figure 305. Décanteur type P à raclage radial. Vue générale.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

diamétrale entraînée à ses deux extrémités par un motoréducteur. Mais l'entraînement central est souvent préféré à l'entraînement périphérique: dans ce cas, les racleurs de fond (et de surface le cas échéant) sont solidaires d'une charpente diamétrale suspendue au centre à une tête de commande centrale entraînant l'ensemble en rotation.

Cette tête de commande à entraînement central **CENTRIDEG** (figure 307), autorisant des couples mécaniques plus élevés, est fixée dans l'axe du bassin, le plus généralement sur fût central en béton ou, pour les petits diamètres, sur une passerelle d'accès, diamétrale, réalisée en acier ou en béton (cas des décanteurs-épaississeurs).

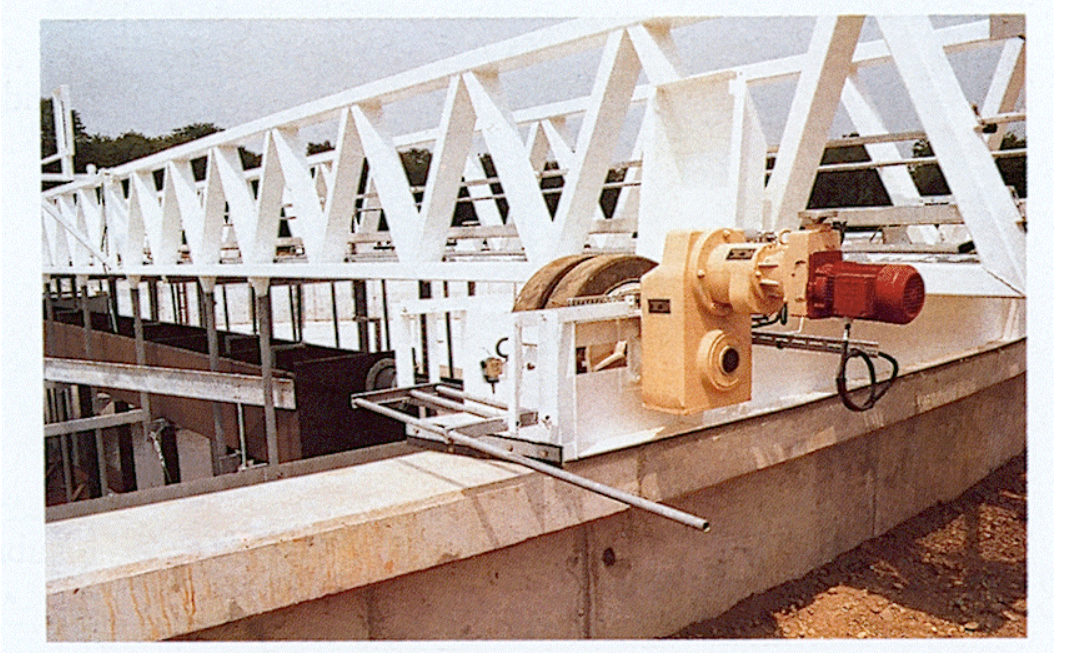
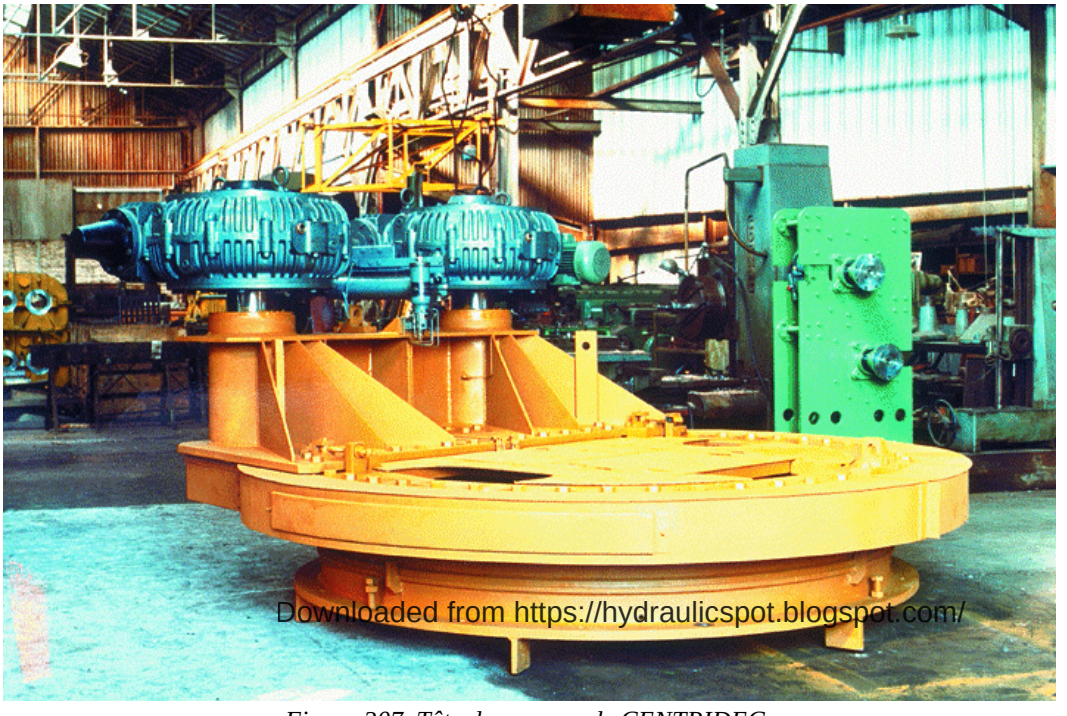


Figure 306. Décanteur type P - Motoréducteur d'entraînement périphérique.

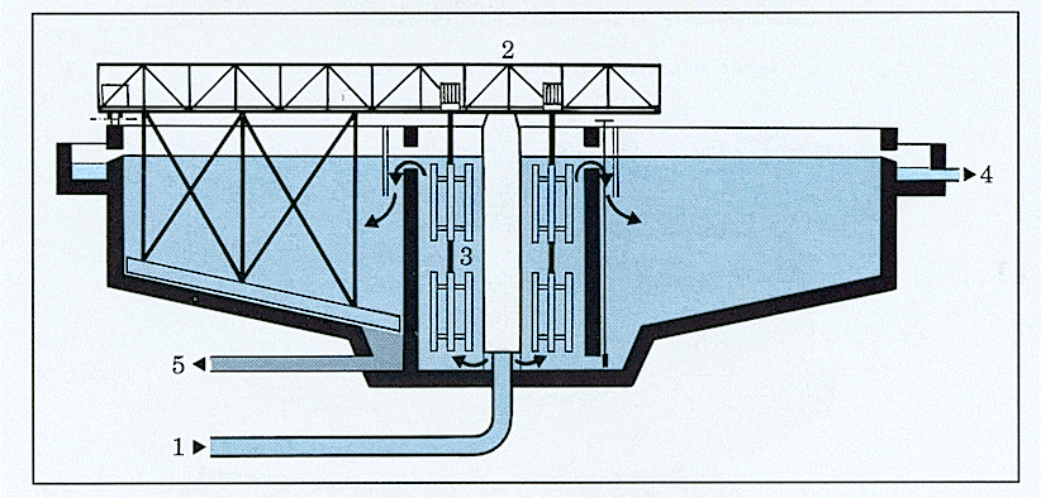


Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 307. Tête de commande CENTRIDEG.

Dans les traitements d'EP et d'ER, les décanteurs circulaires raclés, à entraînement périphérique, peuvent être munis d'une zone centrale de floculation dont les brasseurs à vitesse lente sont également embarqués sur la passerelle-support (figure 309). L'eau floculée passe par de larges orifices dans la zone de décantation où se déposent les particules floculées avec les matières sédimentables.

Figure 308. Installation de VALENTON (Val-de-Marne) pour le SIAAP. Débit: 300 000 $m^3.j^{-1}$. Tête d'entraînement sur fit béton du décanteur primaire Æ 52 m.



1 - Arrivée d'eau brute
2 - Pont racleur.
3 - Zone de floculation.
4 - Sortie d'eau décantée.
5 - Évacuation des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 309. Décanteur floculateur avec entraînement périphérique du pont.

Figure 310. Installation de CANNES (Alpes-Maritimes). Débit maximum : 5500 $m^3.h^{-1}$. Décanteur-floculateur.

DEGRÉMONT a normalisé une gamme de décanteurs allant de 6 à 60 m de diamètre. Les hauteurs droites à la périphérie sont comprises entre 2 et 4 m. La vitesse périphérique des racleurs dépend du pourcentage de boues décantables dans l'eau à traiter et de leur densité

dans les décanteurs circulaires raclés, cette vitesse est de l'ordre de 1 à 3 $cm.s^{-1}$ pour les eaux résiduaires.

. **Décanteurs rectangulaires**

Des ouvrages de forme rectangulaire, éventuellement accolés, présentent l'avantage d'une implantation plus compacte, mais leur coût est plus élevé que celui de décanteurs circulaires, à moins qu'une couverture ou une fermeture totale des ouvrages ne soit imposée. Ils sont généralement à flux longitudinal. On adopte un rapport longueur/largeur normalement compris entre 3 et 6. La profondeur des ouvrages est comprise entre 2,5 et 4 m. Les fosses à boues sont situées à l'aplomb de l'arrivée d'eau brute.

Le dispositif de raclage est, soit entraîné par un pont transversal (figure 311) animé d'un mouvement en va-et-vient, soit constitué de chaînes sans fin munies de raclettes (figure 312). Dans ce dernier cas, le raclage de fond s'opère de l'aval vers l'amont du décanteur et le raclage de surface dans l'autre sens.

Dans la première solution, les manoeuvres des différents racleurs, ainsi que l'inversion du sens de marche du pont, sont entièrement automatiques. La collecte des écumes, prévue à l'aval devant la sortie d'eau décantée, est réalisée en fonction du dispositif de raclage, soit par goulotte précédée d'un plan incliné, soit par tube rainuré rotatif.

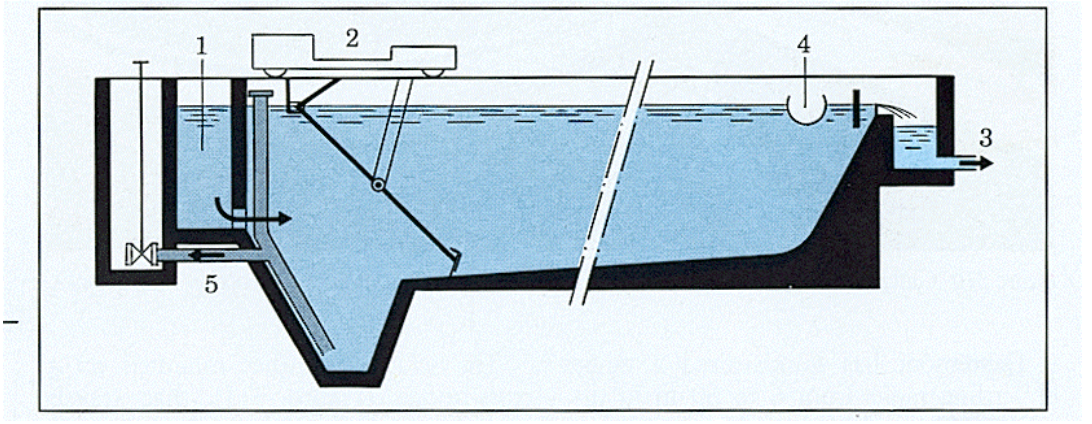
Le dispositif de raclage à chaînes (figure 312) présente l'avantage de permettre des vitesses de déplacement des racleurs faibles (jusqu'à 1 $cm.s^{-1}$ du fait de leur grand nombre. Par contre, la totalité du système de raclage est immergée et la

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

largeur des racleurs - qui ne peut guère dépasser 6 m - conduit à multiplier les unités. Pour éviter un très grand nombre de trémies, la collecte générale des boues conduit à installer un racleur transversal.

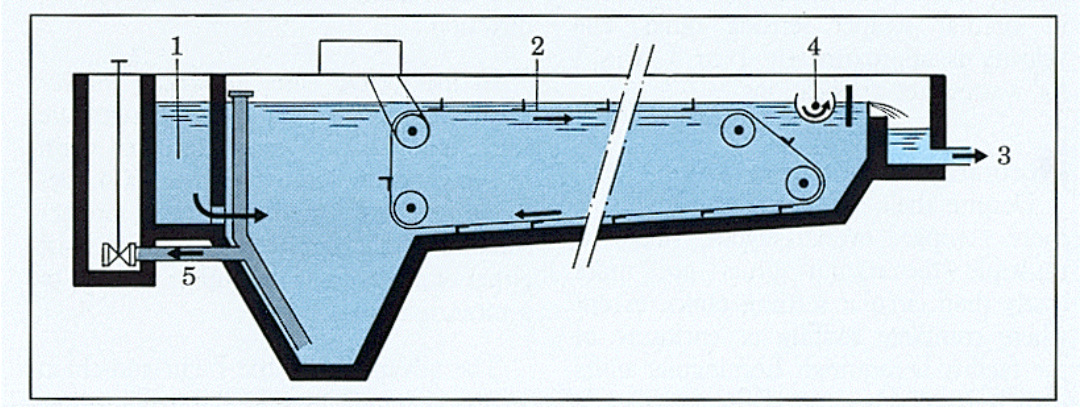
La réalisation de décanteurs de grande longueur est, dans tous les cas, difficile. Elle peut nécessiter de réduire la pente du radier jusqu'à 1 % ; elle peut conduire aussi à ménager, dans le radier du bassin, une ou plusieurs reprises de boues, fixes et disposées sur toute la largeur de l'ouvrage.

Dans le cas de racleur à pont, le transfert des boues vers les fosses d'extraction peut devenir impossible, surtout si le volume des boues est important et si ces boues sont fermentescibles. Les décanteurs rectangulaires à succion permettent de résoudre ce problème (voir page 658).



1 - Arrivée d'eau brute.
2 - Pont racleur.
3 - Sortie d'eau décantée.
4 - Reprise des flottants.
5 - Évacuation des boues.

Figure 311. Décanteur longitudinal à pont racleur.



1 - Arrivée d'eau brute.
2 - Chaîne racleuse..
3 - Sortie d'eau décantée.
4 - Reprise des flottants.
5 - Évacuation des boues

Figure 312. Décanteur longitudinal à chaînes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 313. Installation de AÏRE pour le traitement des effluents de GENÈVE (Suisse). Débit: 3,6 $m^3.s^{-1}$. Un des 8 décanteur à chaînes de 70 m X 18,,5 m.

Figure 314. Décanteur à pont transbordeur (4 fois 50 m X 200 m).

Enfin, il est possible d'envisager des ponts racleurs enjambant et desservant simultanément plusieurs décanteurs et aussi de n'avoir qu'un seul pont se transbordant périodiquement d'un décanteur à l'autre (figure 314).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.1.2. Les SÉDIPAC

Le SÉDIPAC (figure 315) est un appareil combiné qui réunit dans une même enceinte, une zone de coagulation floculation (3), et une zone de décantation lamellaire.

Le transfert de l'eau floculée entre ces deux zones est assuré par des canaux (4) placés de part et d'autre de la zone de décantation lamellaire, qui répartissent le débit d'eau à décanter dans les chambres de tranquillisation localisées sous les canaux. Le liquide pénètre ensuite transversalement sous les modules lamellaires (5).

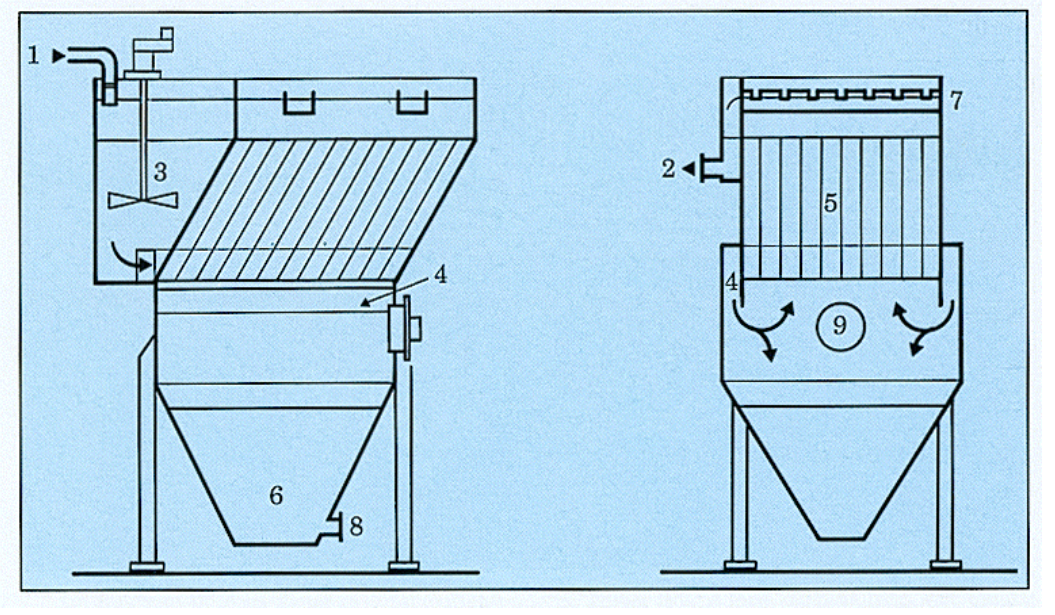
La majeure partie des boues décante alors sur le fond (6) de l'appareil, alors que la séparation du floc résiduel s'effectue dans les modules lamellaires. L'eau clarifiée, récupérée en surface dans des goulottes (7), est évacuée par le canal (2). Un tampon de visite (9) est prévu.

Les modules lamellaires (figure 316), inclinés à 60° sur l'horizontale, sont en polystyrène "choc". Ils sont constitués de tubes à section hexagonale; le diamètre hydraulique est de 80 mm, et la longueur de 1500 mm. L'importance de la section transversale de ces tubes permet de minimiser le risque de bouchage en présence de graisse et particules fibreuses (tableau 75).

La forme hexagonale présente les avantages suivants:

- une ouverture maximale pour une performance hydraulique et une longueur de module données.
- une absence de flexion sous le poids des boues, à la différence des modules lamellaires à plaques.

Les SÉDIPAC sont surtout utilisés pour traiter des eaux résiduaires industrielles ou urbaines, dont le temps de floculation est de 5 à 10 minutes.



1-Entrée d'eau brute..
2-Sortie d'eau décantée.
3 -Floculation.
4 - Canal de répartition d'eau floculée
5-Décantation lamellaire
6 - Concentration des boues
7-Reprise d'eau décantée.
8-Extraction des boues.
9 - Tampon de visite

Figure 315. SÉDIPAC. Schéma de principe.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

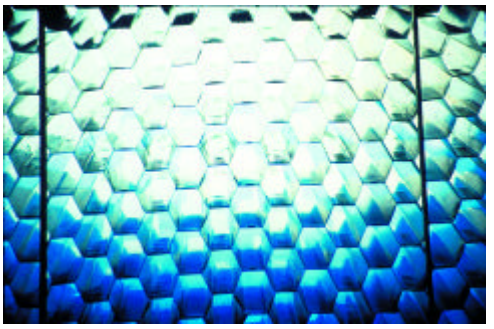


Figure 316. Modules lamellaires DEGRÉMONT.

Tableau 75. Les modules DEGRÉMONT.

Modules hexagonaux				
Diamètre hydraulique mm	80		50	
Écartement entre plaques mm	80		50	
Angle d'inclinaison	60°		60°	
Longueur m	0,75	1,5	0,75	1,5
Surface projetée m2 module/m^2 de décanteur	5,4	10,8	8,7	17,4

3.1.2.1. SÉDIPAC métalliques

Ces appareils (figure 317) sont entièrement monoblocs et sans raclage mécanique. Ils sont prévus pour être revêtus par peinture anticorrosion et toutes les parties sont accessibles pour subir au préalable un traitement de la tôle par grenaillage ou sablage.

Ils sont essentiellement équipés

- d'un hélicomélangeur à variateur de vitesse,
- d'une ou plusieurs vannes d'extraction de boues.

Ils présentent les dimensions suivantes : surface de décantation de 3 à 21 m^2,hauteur hors tout de 4,4 m à 6,4 m. Les SÉDIPAC se prêtent bien à la réalisation d'unités de traitement compactes, incorporant un poste d'injection de plusieurs réactifs et un contrôle automatisé.

3.1.2.2. SÉDIPAC en béton

Ces appareils sont utilisés en général pour traiter des eaux chargées (MES : environ 0,1 à 1 $g.l^{-1}$), dont le débit est supérieur à 300 $m^3 h^{-1}$. Le temps de floculation est de l'ordre de 5 à 10 minutes, mais il peut être augmenté si la qualité de l'eau à traiter l'exige. La vitesse de décantation peut atteindre 15 $m.h^{-1}$, calculée sur la surface de décantation équipée de modules lamellaires (exceptionnellement 18 $m.h^{-1}$).

Ces appareils, plus larges que les SÉDIPAC métalliques, sont réalisés avec deux zones parallèles de décantation lamellaire de 2 ou 3 m de large chacune. Ils disposent d'équipements mécaniques d'extraction des boues. La hauteur d'eau est de 4 à 4,5 m et les surfaces de décantation peuvent aller jusqu'à 120 m^2.

- **SÉDIPAC R**

Il est équipé d'un pont racleur (figure 318) comprenant une poutre transversale (1) au milieu de laquelle est fixée un bras articulé (2) terminé par une lame racleuse (3). Le bras articulé circule entre les parois (4) séparant les deux zones de décantation (5). L'eau traitée est collectée en surface, soit par des goulottes (6), soit par des collecteurs immergés.

- **SÉDIPAC U**

Il est équipé d'un pont suceur (figure 319), et sa conception, avec des canaux de distribution d'eau floculée facilement accessibles pour être nettoyés, permet de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 317. SÉDIPAC métallique. Installation de RHEINFELDEN (RFA).

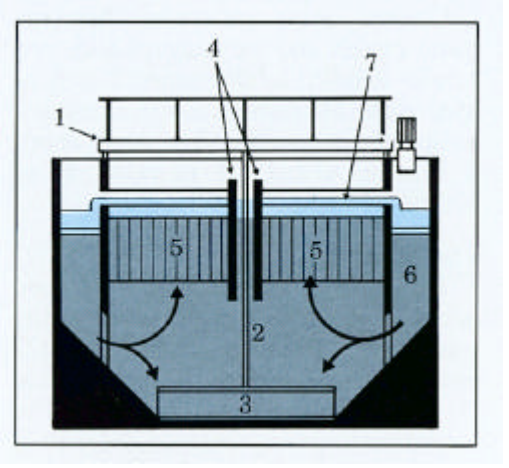


Figure 318. Décanteur SÉDIPAC R.

l'utiliser avec efficacité pour le traitement physico-chimique des ERU.

Le pont suceur est composé d'une poutre porteuse (1) sur laquelle est fixé un cadre (2) entourant l'ensemble des deux zones de décantation (3) servant de support à l'ensemble des tubes suceurs (4).

L'eau floculée est distribuée par les canaux (6), puis tranquillisée dans les zones (5).

L'eau traitée est récupérée dans des goulottes tranversales se déversant dans deux canaux d'évacuation (7), situés de part et d'autre du canal central de distribution.

La même technique peut être mise en oeuvre pour la réalisation de décanteurs lamellaires de grande dimension ne comportant pas de floculation préalable. Tel est le cas de décanteurs primaires pour les installations d'ERU requérant un encombrement réduit.

- **SÉDIPAC C**

Cet appareil est particulièrement adapté pour la clarification des eaux à forte variation de concentration en MES pouvant atteindre plusieurs grammes par litre (figure 321).

La zone de décantation, carrée, est équipée d'un racleur de fond à entraînement central. Le fond est réalisé avec une pente partant du centre vers la périphérie. La boue est évacuée par quatre fosses d'angle. Ce dispositif permet d'éliminer de grandes quantités de boue avec une perte en eau minimale. La distribution hydraulique est identique à celle des autres SÉDIPAC.

3.1.3. Décanteurs à succion des boues

Les décanteurs raclés à succion des boues sont essentiellement utilisés dans la clarification des boues activées. Leur différence essentielle avec les décanteurs utilisés à seule fin de séparation est de permettre un recyclage très important des boues sédimentées (de 50 à 100 %, du débit traité, voire plus).

Pour éviter les perturbations hydrauliques liées au transfert et à la reprise en

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

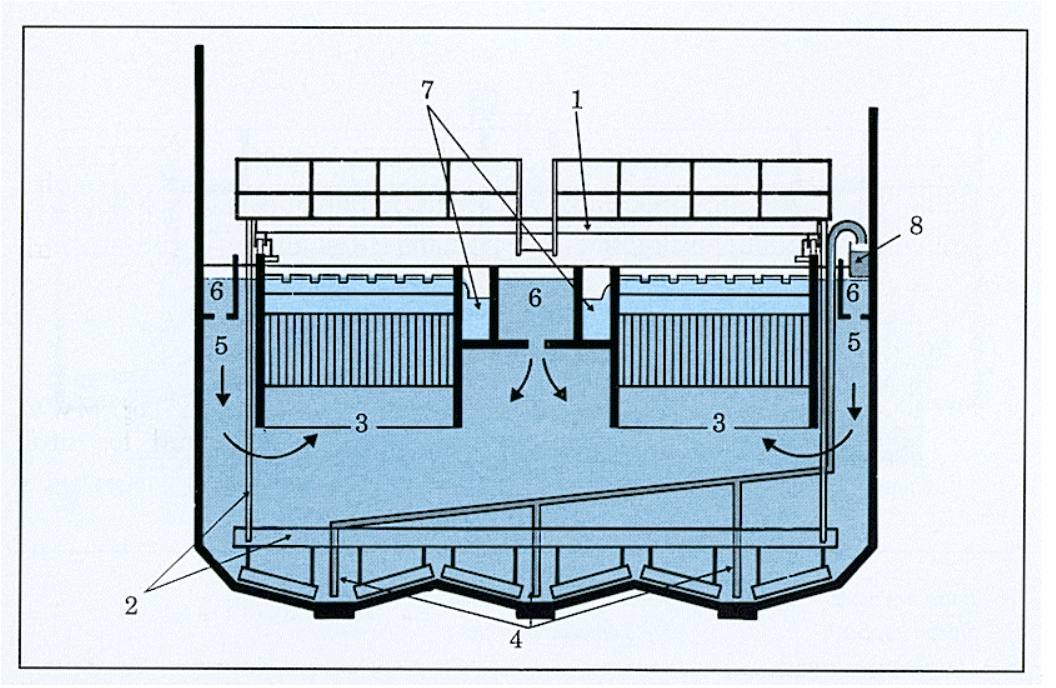
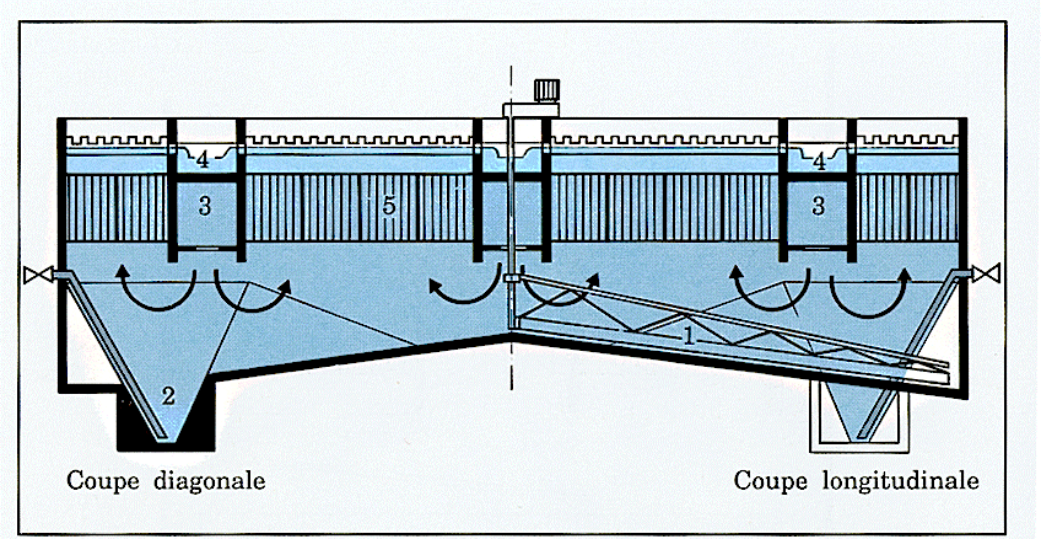


Figure 319. Décanteur SÉDIPAC U.

Figure 320. Installation de NICE (Alpes-Maritimes). Débit: 220 000 $m^3.j^{-1}$. Vue d'ensemble des 10 SÉDIPAC U de 7 x 21,1 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Râcleur de fond.
2 - Fosse à boue d'angle.
3 - Canaux de distribution.
4 - Canaux d'eau traitée.
5 -Modules lamellaires
Figure 321. SÉDIPAC C.

un point d'un grand débit de boue, tout en assurant la recirculation rapide de celle-ci, il est préférable de multiplier les points de soutirage.

La technique des décanteurs à succion, qui associe à chaque élément racleur un tube suceur, répond à cet objectif. Elle peut être appliquée aussi bien à des décanteurs circulaires que rectangulaires et de nombreux modes de mise en oeuvre sont possibles. L'effet de succion est le plus souvent obtenu par simple pression hydrostatique.

3.1.3.1. Ouvrages circulaires

Le dispositif de raclage à succion s'applique en général à des diamètres d'ouvrages supérieurs à 20 m; il est calculé pour des boues ne nécessitant par un couple supérieur à 3 daN.m par m^2 de surface liquide.

D'une manière générale, les racleurs de fond sont supportés et entraînés par des bras triangulés à partir de la passerelle-support, sans roulette d'appui sur le radier; ils reçoivent chacun un tube de succion en PVC ou PEHD dont l'écartement avec le suivant varie du centre vers la périphérie. Ces tubes débouchent dans un bac de collecte. Une manchette télescopique à niveau de déversement réglable installée au débouché de chaque tube suceur permet un contrôle de débit visuel et individualisé. Une introduction d'air peut être prévue dans la partie droite ascendante de chaque suceur qui fonctionne alors en pompe à émulsion.

L'évacuation des boues depuis le bac de collecte, mobile, vers la conduite d'extraction, fixe, incorporée à l'ouvrage, est réalisée au moyen d'un siphon du type déprimé comportant un dispositif d'amor-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

çage. Ces appareils peuvent également être équipés de racleurs de surface pour l'extraction des écumes.

Dans les décanteurs circulaires à succion normalisés par DEGRÉMONT, la branche aval du siphon est dans l'axe de l'ouvrage.

- **Succion radiale**

Type SV (figure 322)

L'ensemble se caractérise par un pont radial à entraînement périphérique et pivot sur fût central, avec poutre surbaissée semi-immergée, faisant office de goulotte de reprise des boues.

Diamètre de réalisation inférieur à 40 m.

Type SR (figure 323)

Le type SR comporte un pont radial constitué d'une poutre horizontale, hors d'eau, formant passerelle, en tôle pliée ou en treillis pour les grands ouvrages. Le bac semi-immergé de collecte des boues est fixé à la passerelle.

Diamètre de réalisation jusqu'à 40 m.

La variante SRP (figure 3 2 4) consiste à prolonger la passerelle en porte à faux sur le tiers du rayon opposé et à augmenter ainsi la reprise des boues dans la zone centrale. Un deuxième bac de collecte et une deuxième branche amont de siphon sont prévus.

Diamètre de réalisation pouvant dépasser 50 m.

- **Succion diamétrale**

Type SD

La succion en ligne peut très bien s'appliquer, aussi, tout au long du diamètre. Dans ce cas, on ajoute au type d'appareil à entraînement central décrit en page 644, les dispositifs de succion et de restitution des boues activées. Le siphon à deux branches plonge dans un bac de collecte annulaire tournant commun à tous les suceurs (figure 325).

Diamètre de réalisation jusqu'à 60 m.

- **Succion annulaire**

Type SUCCIR

Dans ce type d'appareil (figure 326), il est recherché une reprise plus équilibrée des boues dans la zone centrale.

La construction courante est celle d'un

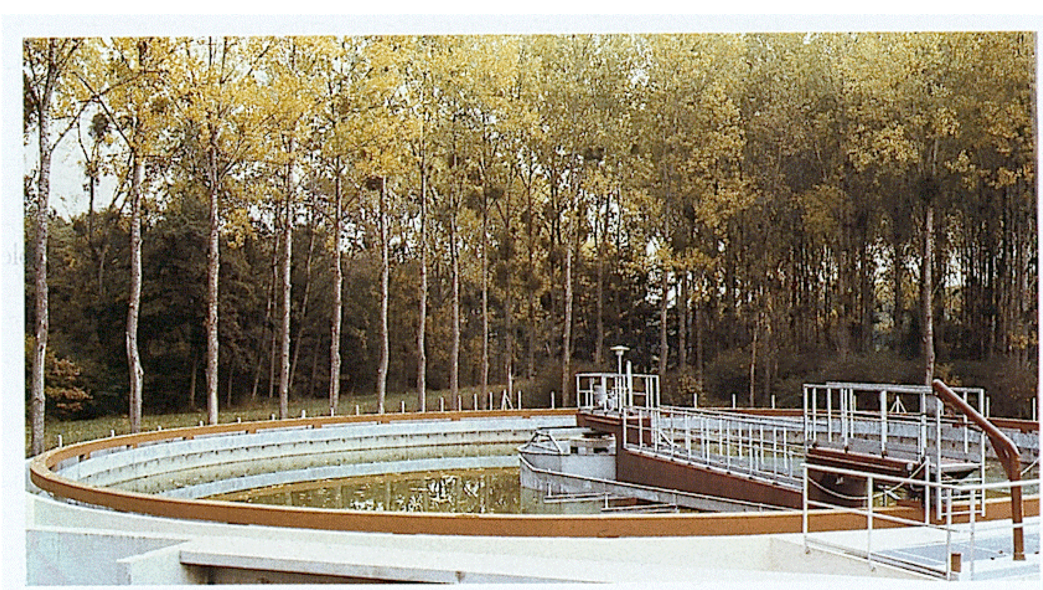


Figure 322. Installation de ZELLWILLER (Bas-Rhin) pour le Syndicat du Cosn de Barr. Décanteur type SV.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

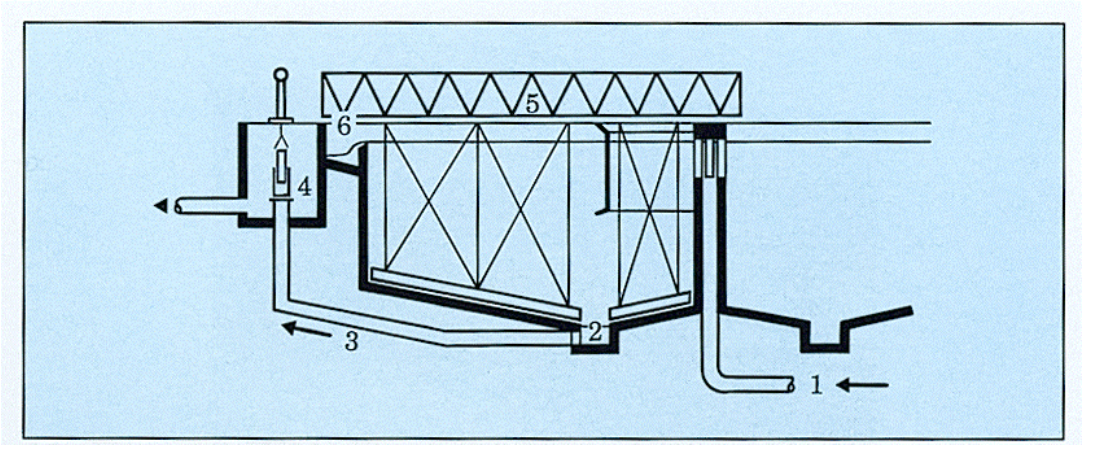
pont radial à entraînement périphérique. Les tubes de soutirage, tournant avec le pont, sont disposés pour la plus grande part suivant un cercle concentrique à l'ouvrage et situé au tiers du rayon, les autres restant en ligne avec les racleurs.

Diamètre de réalisation de 30 à plus de 5Om. Une réalisation rustique de cette technique consiste à prévoir l'extraction annulaire au moyen de conduits noyés dans le radier; cette solution n'est envisageable qu'avec des ouvrages de dimensions limitées.

Figure 323. Installation de PLOEGSTEERT-COMINES (Belgique) pour la C.U.D.L. Débit: 22 650 m^3/j. Vue aérienne des décanteurs type SR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 324. Installation de MULHOUSE (Haut-Rhin). Débit: 98135 m^3 j^{-1}. Décanteur type SRP.



1-Alimentation.
2-Caniveau circulaire + plaque de couverture avec trous calibrés.
3 -Boues en recirculation.
4-Puisard avec cannes télescopiques de réglage
5-Équipement de raclage standard.
6 -Reprise d'eau décantée.

Figure 325. Vue schématique d'un décanteur SUCCIR simplifié.

Figure 326. Installation de ROANNE (Loire). Débit: 30 000 m^3 j^{-1}. Décanteur type SUCCIR ∅ 54 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

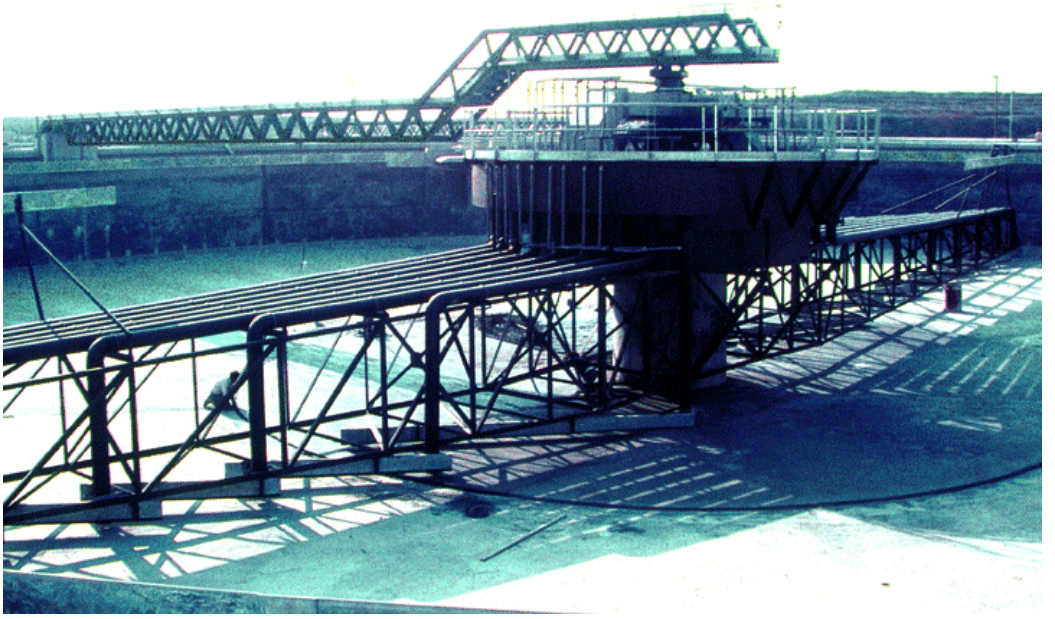


Figure 327. Installation de VALENTON (Val-de-Marne) pour le SIAAP. Débit 300 000 $m^3.j^{-1}$. Décanteur type SD ∅ 52 m.

3.1.3.2. Ouvrages rectangulaires

La forme rectangulaire se prête plus difficilement que la forme circulaire à la réalisation d'ouvrages de très grande surface unitaire. Une attention particulière doit être apportée à la bonne équirépartition du débit à l'entrée, à la collecte de l'eau décantée, et à l'absence de zones de radier non raclées. Ces décanteurs sont généralement à flux longitudinal avec un fond sensiblement plat.

Dans le principe, ils sont équipés des mêmes dispositifs de raclage et de succion que ceux prévus pour les décanteurs circulaires. En fonction de la taille de l'ouvrage, la boue est reprise soit par siphon(s), pompe(s) ou air lifts) et l'évacuation des écumes est réalisée par goulotte ou tube rainuré.

Le dispositif de raclage est généralement constitué d'un pont transversal en va-et-vient à fonctionnement automatique, dont la vitesse linéaire d'avancement varie de 3 à 4,5 $cm.s^{-1}$ en fonction de la longueur du bassin. Il est calculé pour un effort de raclage inférieur à 20 daN par mètre de largeur du bassin. Le système d'entraînement est équipé soit de roues à bandage élastomère pour roulement sur le béton avec galets latéraux de guidage, soit de galets acier pour roulement sur rails.

Type SLP (pour les petits ouvrages)

Les boues sont relevées par air lifts) dans une goulotte latérale ou directement dans le bassin d'aération accolé (figure 328).

Largeur jusqu'à 7 m, longueur jusqu'à 35 m. Hauteur d'eau: 2,5 m à 3 m.

Type SLG

L'extraction des boues se fait généralement sous pression hydrostatique par un siphon déprimé, embarqué sur le pont, assurant leur transfert depuis le bac de collecte jusqu'à une rigole latérale. La succion linéaire mobile peut être complétée par des extractions transversales fixes.

Cette construction est envisageable pour des ouvrages pouvant atteindre 20 m de large et 70 m de long (figure 329).

- **Exécutions spéciales**

Décanteur à flux transversal

Cette variante est surtout intéressante dans le cas où elle rend possible une implantation plus intégrée du décanteur et du bassin d'aération, mais l'équipe-

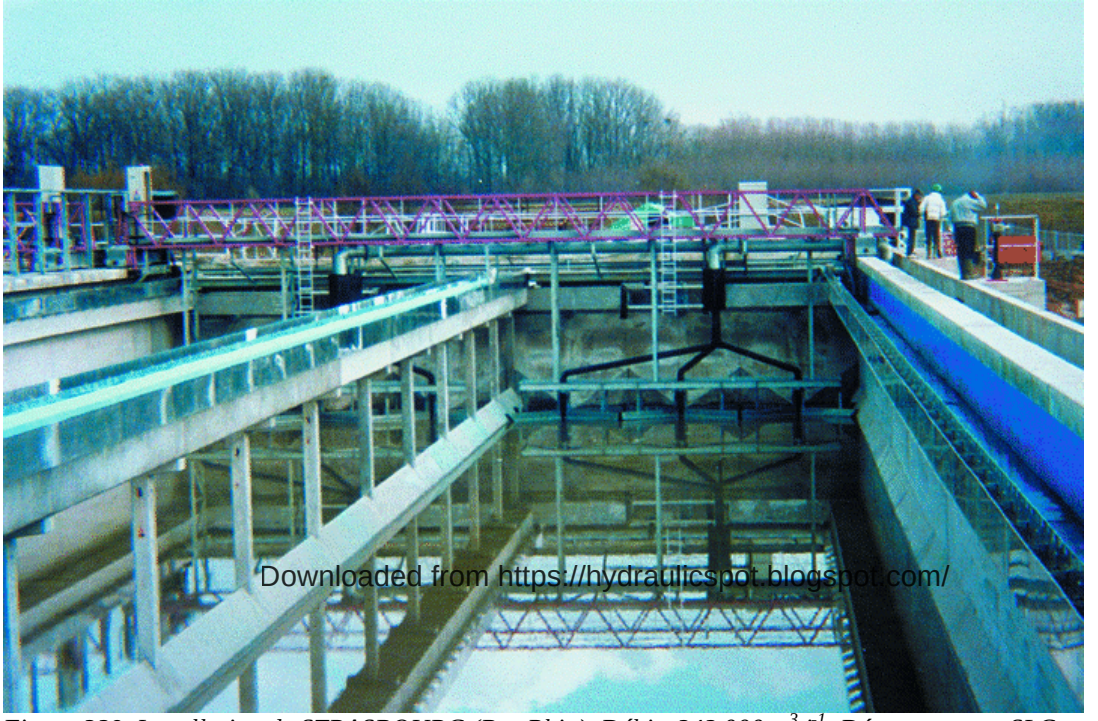
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

partition de la liqueur mixte à l'entrée est particulièrement importante (figure 330).

Décanteur à extraction fixe répartie et succion mobile d'appoint

La plus grande partie des boues recirculées est extraite au moyen d'une série d'airlifts fixes, disposés tout au long et dans l'axe du bassin, débouchant dans une rigole générale de collecte (figure 331). Un pont en va-et-vient muni de racleurs et d'air-lifts assure la netteté du radier en même temps qu'un complément de recirculation

Figure 328. Décanteur type SLP.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 329. Installation de STRASBOURG (Bas-Rhin). Débit: 242 000 $m^3.j^{-1}$. Décanteur type SLG: 18 unités de 20 x 66 m.

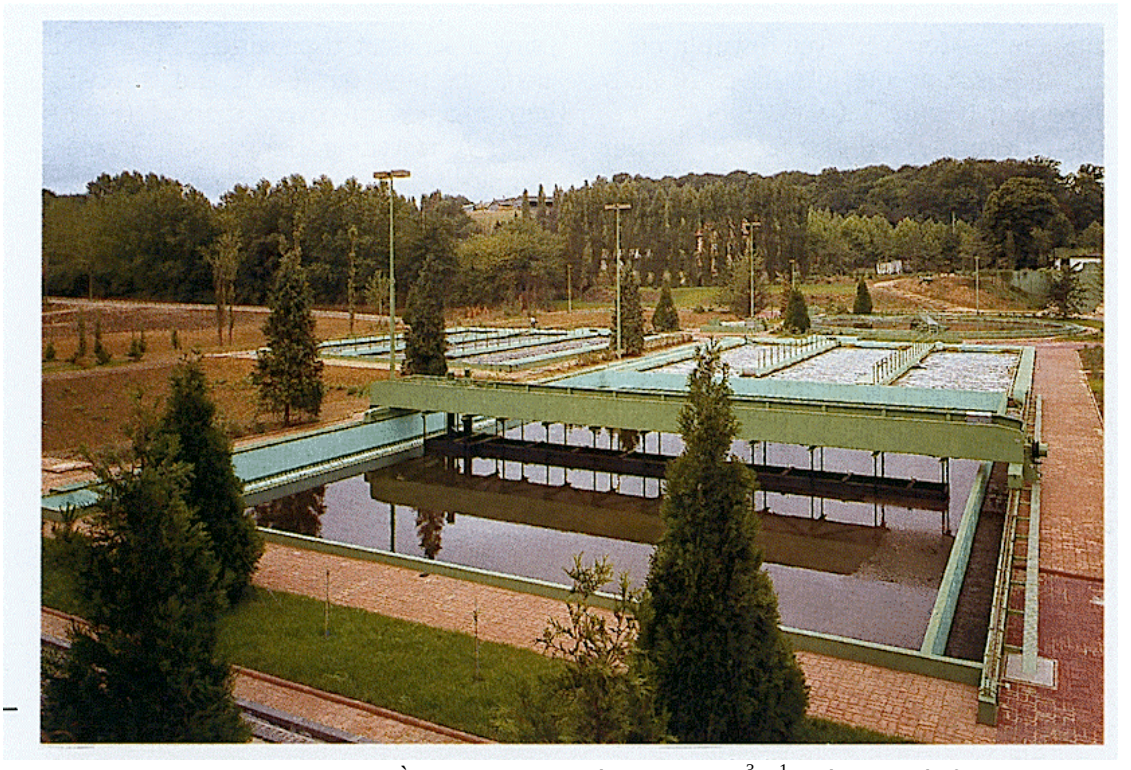
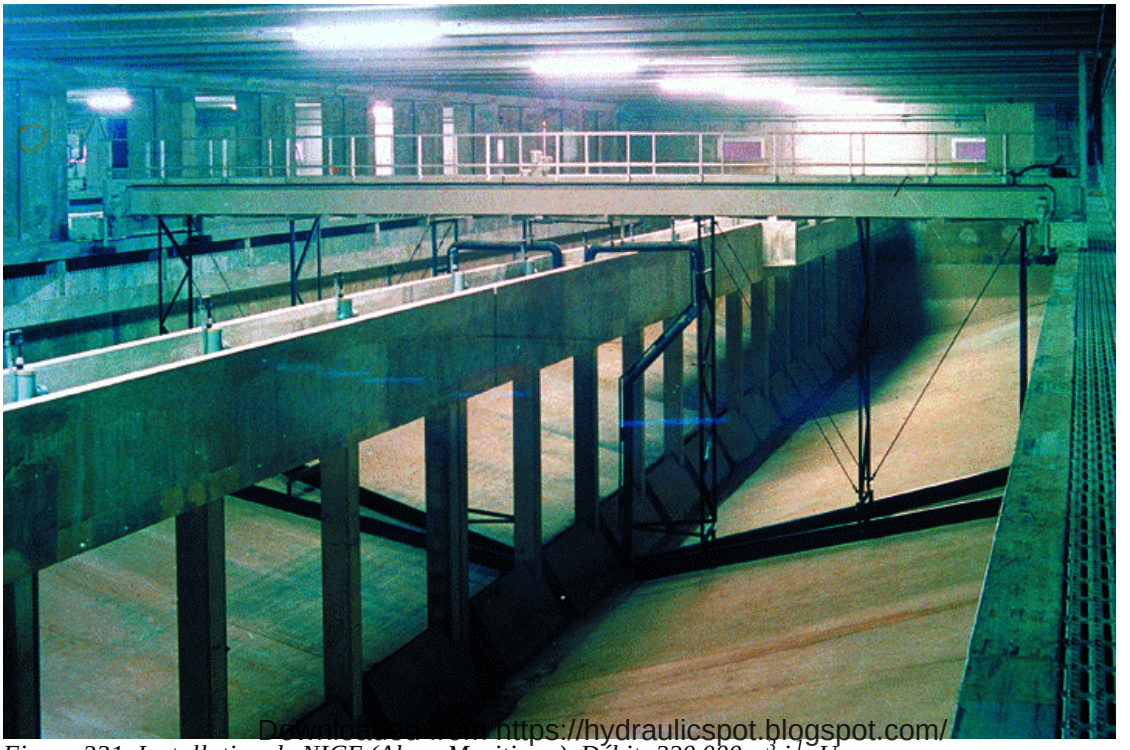


Figure 330. Installation de LA MINIÈRE (Yvelines). Débit: 12 000 m^3 j^{-1}. Décanteur à ,flux transversal de 21 m x 29,5 m.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 331. Installation de NICE (Alpes-Maritimes). Débit: 220 000 m^3 j^{-1}. Un des 12 décanteurs secondaires de 15 m x 60 m.

3.2. DÉCANTEURS À CONTACT DE BOUE

3.2.1. Décanteurs à lit de boues

Dans ce type de décanteur, les boues formées par la floculation constituent une masse en expansion à travers laquelle l'eau passe de bas en haut, de manière régulière et uniforme. L'eau brute à traiter est introduite à la base du lit de boues par un système de répartition qui provoque un brassage continu. L'eau flocule en passant à travers le "lit filtrant" que constitue les boues et ressort clarifiée à la partie supérieure du décanteur.

Si on introduit l'eau à la base du lit de boues de façon continue, on constate qu'au bout d'un certain temps la boue ne reste pas en suspension dans le liquide (voir page 142). Elle se tasse au contraire progressivement dans certaines zones et, finalement, on observe **une masse compacte de boue tassée,** au sein de laquelle l'eau s'est créé des passages préférentiels. Dans ces conditions, il n'y a plus de contact efficace entre l'eau qui traverse le lit de boues et les boues qui le constituent.

Par contre, si on effectue l'admission d'eau **d'une manière intermittente,** en introduisant l'eau avec un fort débit pendant un instant très court, suivi d'une période de repos prolongé, on constate que **la masse de boue se maintient en suspension régulière.** Toute la boue se trouve entraînée vers le haut pendant l'introduction de l'eau, mais ensuite, pendant la période de repos qui succède, elle décante d'une manière régulière comme elle le ferait dans une éprouvette d'eau boueuse maintenue au repos absolu. On aboutit ainsi à l'obtention d'une masse de boues homogène en tous ses points.

On peut réaliser une telle expérience, en éprouvette, en laboratoire, et mesurer ainsi la vitesse ascensionnelle limite à laquelle on peut soumettre un lit de boue
c'est la mesure du coefficient de cohésion de la boue (voir page 351). Cette vitesse ascensionnelle limite dépend de nombreux facteurs: nature de l'eau à traiter, taux de traitement en coagulant, en adjuvant de floculation, température, etc.

3.2.1.1. Le décanteur PULSATOR

C'est le décanteur le plus répandu dans le monde: plus d'un million de mètres cubes d'eau est traité chaque heure, dans des décanteurs PULSATOR.

C'est un décanteur à lit de boues simple, d'une grande fiabilité, souple d'emploi, facilement adaptable à des bassins existants pour en augmenter la capacité de traitement.

Généralement utilisé en clarification des eaux, il permet d'atteindre des vitesses ascensionnelles comprises entre 2 et 4 $m.h^{-1}$, voire plus dans des cas exceptionnels, suivant la valeur du coefficient de cohésion de la boue.

Le décanteur (figure 332) est constitué par un bassin à fond plat, muni à sa base d'une série de tuyaux perforés (9) permettant d'introduire l'eau brute uniformément sur tout le fond du décanteur. A la partie supérieure, une série de tuyaux perforés ou de goulottes (2) permet une reprise uniforme de l'eau décantée en évitant toute irrégularité de vitesse dans les différentes parties de l'appareil.

Pour alimenter le collecteur inférieur d'une manière discontinue, différents moyens peuvent être employés. Ils se ramènent tous à stocker pendant un

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

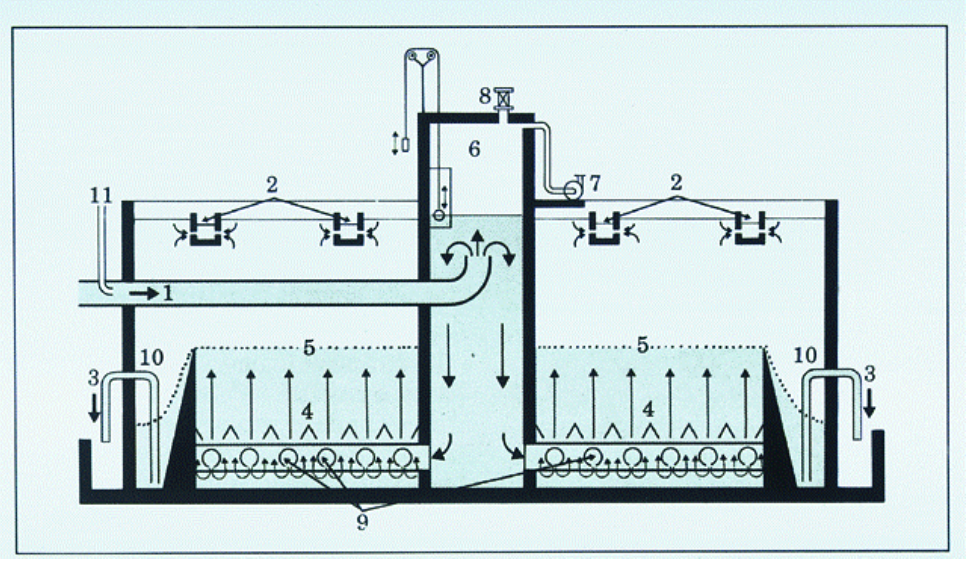
certain temps un certain volume d'eau brute qu'on fait ensuite pénétrer rapidement dans l'appareil.

Le procédé le plus économique pour effectuer cette opération consiste à introduire l'eau brute dans une cloche (6) à l'intérieur de laquelle on aspire l'air à l'aide d'une machine aspiratrice (7) déplaçant un débit d'air sensiblement égal à la moitié du débit maximal d'eau à traiter. Cette cloche est mise en communication avec le collecteur inférieur du décanteur.

Dans ces conditions, le niveau de l'eau brute monte progressivement dans la cloche. Lorsqu'il a atteint une valeur comprise entre 0,60 m et 1,00 m au-dessus du niveau de l'eau dans le décanteur, un relais électrique commande l'ouverture brusque d'une vanne (8) de mise en communication de la cloche avec l'atmosphère. La pression atmosphérique s'applique donc immédiatement sur l'eau stockée dans la cloche, qui pénètre dans le décanteur avec une grande vitesse.

Ces appareils sont généralement réglés de telle sorte que la vidange de la cloche dans le décanteur s'effectue en 5 à 20 secondes, alors que le remplissage de cette cloche dure de 20 à 40 secondes.

L'aspiration dans la cloche s'effectue à l'aide d'un ventilateur ou d'un surpresseur fonctionnant en pompe à vide. Les ouvertures et les fermetures de la vanne de mise en communication avec l'atmosphère sont commandées en fonction des



1 - Arrivée d'eau brute.
2 - Sortie d'eau décantée.
3 - Extraction des boues.
4 -Tranquillisateurs.
5 - Niveau supérieur du lit de boues.
6 - Cloche à vide.
7 - Pompe à vide.
8 - Vanne automatique casse-vide.
9 - Tuyaux perforés de répartition d'eau brute.
10 -Concentrateurs des boues.
11 -Introduction des réactifs.

Figure 332. Décanteur PULSATOR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

niveaux de l'eau contenue dans la cloche.

Le collecteur général, situé à la partie inférieure du décanteur, possède une très grande section, afin de réduire sa perte de charge. Les orifices disposés sur ses ramifications sont calculés de telle sorte qu'il se constitue, dans la moitié inférieure du décanteur, un lit de boues homogène. Ce lit est animé de mouvements alternatifs verticaux et tend à augmenter de volume du fait des impuretés apportées par l'eau brute et des réactifs introduits: son niveau monte régulièrement. Une certaine zone du décanteur est réservée pour former les fosses à fond incliné (10) dans lesquelles la boue en excès se déverse et se concentre. On effectue les purges d'une manière intermittente, par les conduites (3). Un avantage important du dispositif est que, si l'on effectue une purge trop importante de boue, on observe une perte d'eau sans que le lit de boues en soit affecté: la qualité de fonctionnement en reste inaltérée.

L'appareil ne comporte aucun système de brassage mécanique des boues susceptible de briser les flocons déjà formés.

Du fait de la haute concentration du lit de boues et de son rôle tampon, un mauvais ajustage du taux de traitement, une variation du pH de l'eau brute, n'ont pas de conséquence néfaste immédiate: on constate une variation lente de la turbidité de l'eau décantée, mais sans qu'il se produise de départ massif des boues contenues dans le décanteur.

Il est facile de réaliser un décanteur PULSATOR dans une cuve existante, ancien filtre ou réservoir. Ceci permet de moderniser d'anciennes installations et de multiplier leur débit par 2 ou 3. Une telle transformation a été faite par exemple à Buenos-Aires, Argentine : 1 300 000 $m^3.j^{-1}$ à Alexandrie, Egypte : 240 000 $m^3.j^{-1}$.

3.2.1.2. Le décanteur Pulsator Lamellaire ou PULSATUBE

La mise en place, au-dessus du lit de boues du PULSATOR, de modules DEGRÉMONT**,** permet soit d'améliorer la qualité de Peau produite, à vitesse de décantation égale, dans un appareil classique, soit d'accroître cette vitesse qui est alors généralement comprise entre 4 et 8 $m.h^{-1}$ (figure 334).

Figure 333. Installation de PALERMO II pour l'alimentation en eau potable de BUENOS AIRES (Argentine).Débit: 36000 $m^3.h^{-1}$. Clarification d'eau de surface. 4 décanteurs PULSATOR de 99,5m x 27 m

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans ce dernier cas, il convient toutefois d'apporter une attention particulière au système de répartition de l'eau brute et au système de reprise de l'eau décantée une augmentation du débit traité provoque, en effet, une modification du régime hydraulique au travers de ces systèmes.

Les particules de floc ayant échappé au lit de boues se déposent sur les parois inférieures des modules et s'y accumulent en une légère couche jusqu'à ce que leur cohésion leur permette de glisser et de redescendre dans le lit de boues.

3.2.1.3. Le décanteur SUPERPULSATOR

Le SUPERPULSATOR (figure 336) est un appareil à lit de boues dérivé du PULSATOR

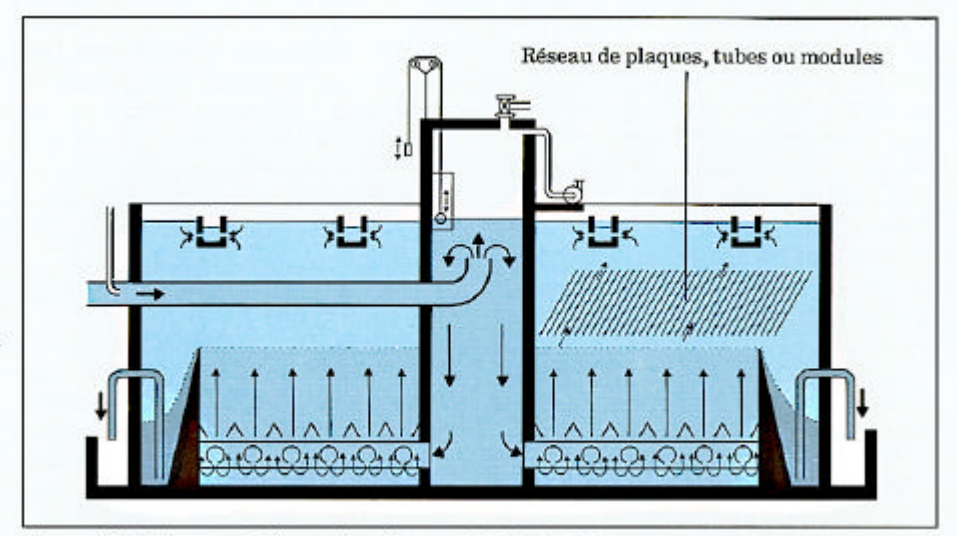


Figure 334. Décanteur Pulsator lamellaire ou PULSATUBE.

Figure 335. Installation de BOUDOUAOU pour l'alimentation en eau potable du GRAND ALGER (Algérie). Débit: 540 000 $m^3 j^{-1}$. Clarification d'eau de surface. 6 décanteurs PULSATUBE. Surface unitaire: 551 m^2.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

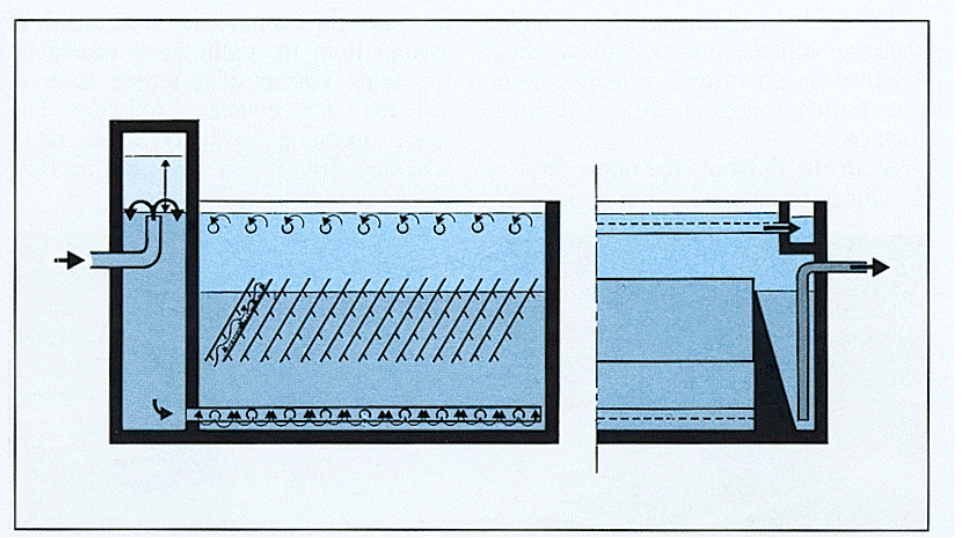


Figure 336. Coupe de SUPERPULSATOR.

C'est un appareil très compact, économique.

Le SUPERPULSATOR combine les avantages respectifs de la décantation à contact de boues, de la pulsation d'un lit de boues et de la densification de la boue par l'effet de la décantation lamellaire. Il possède plusieurs points communs avec le PULSATOR dont il accroît les possibilités. C'est ainsi qu'il en conserve le principe d'alimentation en eau brute et de répartition à la base de l'appareil.

Le mélange "eau coagulée boues déjà floculées" s'élève verticalement en filets parallèles, à travers la zone profonde située entre les tuyaux inférieurs de distribution et les plaques inclinées qui sont ainsi alimentées de façon uniforme. Les "tranquillisateurs" utilisés dans le PULSATOR, peuvent être supprimés ici.

L'eau floculée, parfaitement équirépartie par le réseau de distribution, pénètre ensuite dans le réseau de plaques parallèles inclinées à 60 ° sur l'horizontale et perpendiculaires au concentrateur. La face inférieure de chaque plaque est équipée de déflecteurs qui servent à la fois de supports et d'organes créateurs de mouvements de brassage favorisant la floculation (figure 337).

Les plaques à déflecteurs permettent de maintenir dans le lit de boues une concentration élevée, deux fois supérieure à celle d'un PULSATOR fonctionnant à la même vitesse.

Figure 337. Circulation des boues entre des plaques de SUPERPULSATOR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Cette forte concentration du lit de boues permet au SUPERPULSATOR de jouer le rôle d'un véritable filtre à impuretés, avantage majeur des décanteurs à lit de boues concentrées, de grande hauteur.

Comme dans le PULSATOR, le niveau supérieur du lit de boues est limité par son déversement dans la zone du concentrateur où ne s'exerce aucune poussée due à la vitesse ascensionnelle. La reprise d'eau décantée est réalisée par un réseau de collecteurs. La souplesse de fonctionnement du SUPERPULSATOR lui permet un démarrage très rapide. Les vitesses ascensionnelles adoptées en clarification varient entre 4 et 8 $m.h^{-1}$.

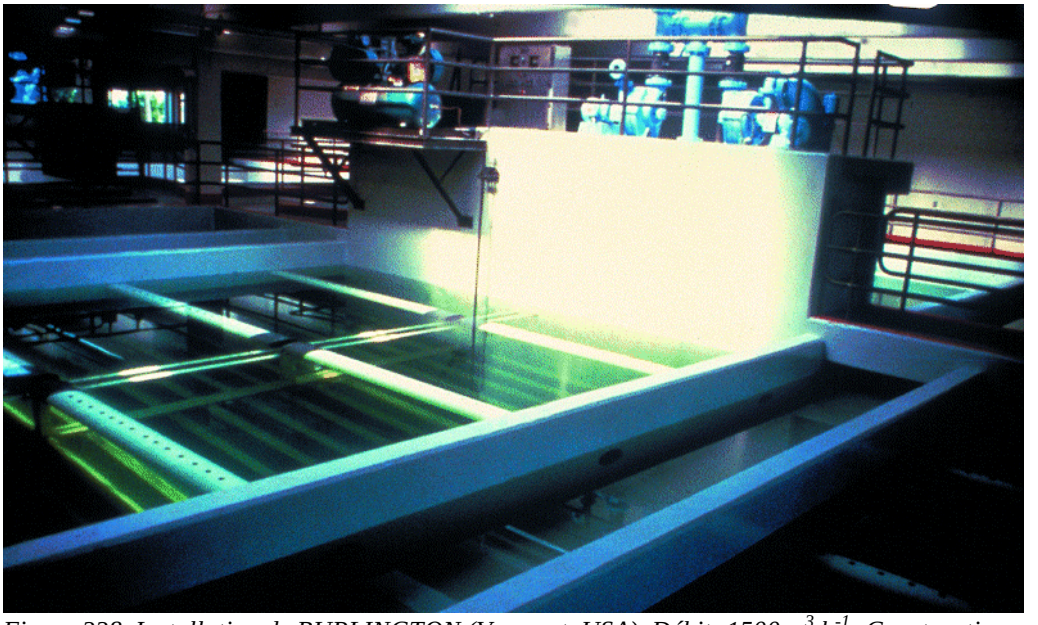
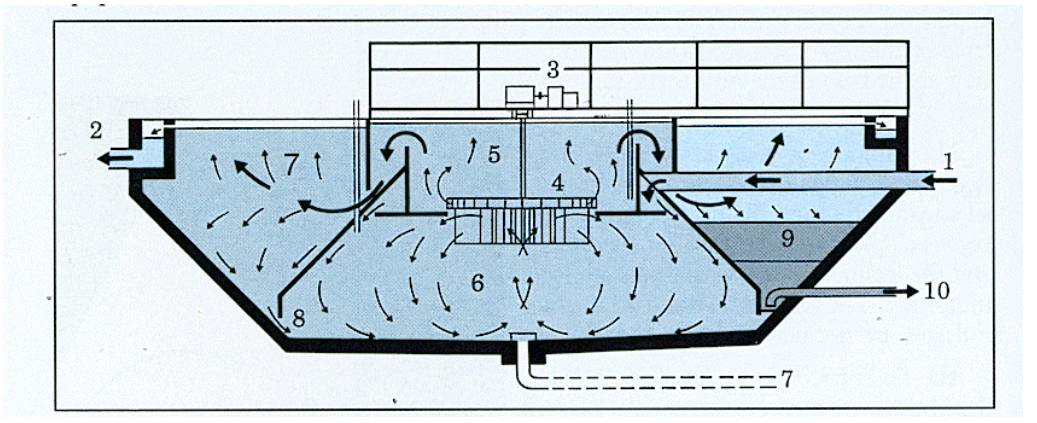


Figure 338. Installation de BURLINGTON (Vermont, USA). Débit: 1500 $m^3.h^{-1}$. Construction de deux SUPERPULSATOR dans d'anciens bassins.



1 - Arrivée d'eau brute. 2 - Départ d'eau traitée. 3 - Groupe d'entraînement 4 - Turbine. 5 - Zone de mélange primaire. 6 - Zone de mélange secondaire. 7 - Eau clarifiée. 8 - Recirculation des boues. 9 -Concentrateur de boues. 10 - Boues en excès.

Figure 339. Décanteur ACCELATOR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.2. Décanteurs à recirculation de boues

Dans ce type d'appareil, les boues sont séparées de l'eau clarifiée dans une zone de décantation. Elles sont ensuite recyclées vers une zone de mélange munie d'une agitation mécanique (ACCELATOR, TURBOCIRCULATOR, CLARICONTACT) ou hydraulique (CIRCULATOR). L'eau brute, additionnée des réactifs, est introduite dans cette même zone de mélange.

3.2.2.1. Le décanteur ACCELATOR.

Le décanteur ACCELATOR (figure 339) comporte une zone centrale de réaction entourée d'une zone de décantation. Ces deux zones communiquent par le haut et par le bas.

Une turbine, située à la partie supérieure de la zone de réaction, fait circuler l'eau vers la zone de décantation. Les boues qui se déposent dans cette dernière reviennent par circulation induite dans la zone centrale. L'enrichissement en boue qui en résulte permet une floculation rapide et la formation d'un précipité dense.

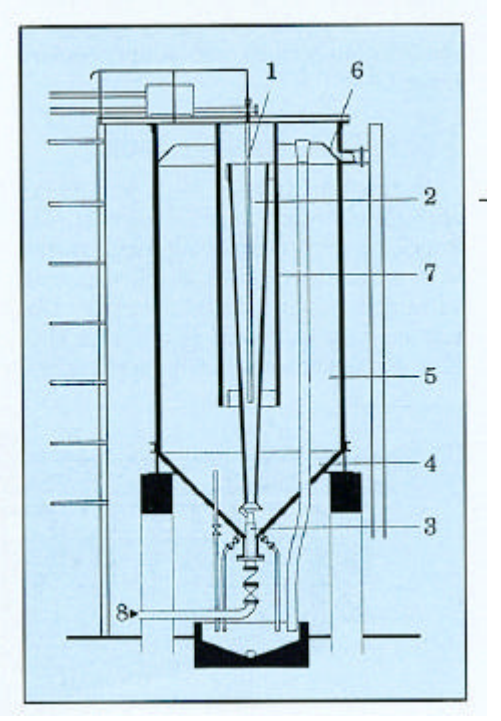
Éventuellement, un agitateur de fond assure un mélange de l'eau brute avec la boue et les réactifs. Il évite en outre (accumulation des dépôts lourds susceptibles de boucher (appareil. Une ou plusieurs fosses à boues permettent d'extraire les boues en excès, sous une forme aussi concentrée que possible.

L'ACCELATOR IS est une variante de l'ACCELATOR comportant un racleur à la partie inférieure de l'appareil. Ce racleur permet un épaississement des boues qui sont dirigées vers les fosses à boues, situées au niveau du radier, d'où elles sont extraites.

3.2.2.2. Le décanteur CIRCULATOR

Le CIRCULATOR (figure 340) est un appareil très simple qui s'adapte parfaitement aux installations moyennes avec de petits diamètres.

Ce type de décanteur comporte un dispositif hydraulique particulièrement étudié assurant l'accélération des réactions par recirculation méthodique des précipités formés avec les réactifs et l'eau à traiter. Il est aussi couramment employé quand on désire obtenir une floculation et une décantation accélérée sous pression.



1 - Réactifs. 2 - Zone de réaction. 3 – Hydro-éjecteur. 4 - Concentration des boues. 5 - Zone de décantation. 6 - Collecteur d'eau décantée. 7 - Jupe déflectrice. 8 - Entrée d'eau brute.

Figure 340. Décanteur CIRCULATOR en décarbonatation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'appareil comporte un fond conique pour aider le glissement des boues vers l'éjecteur qui assure la recirculation. Il n'est équipé d'aucun organe mécanique.

Le CIRCULATOR peut normalement clarifier ou adoucir une eau avec un temps de rétention compris entre 45 min et 2 h selon les cas; la vitesse ascensionnelle de l'eau ne doit pas dépasser 2,5 $m.h^{-1}$ en clarification et 5 à 7 $m.h^{-1}$ en adoucissement.

CIRCULATOR avec raclage

Pour les appareils de très grand diamètre qui ne peuvent avoir une pente de fond suffisante, on utilise un pont racleur, destiné à ramener continuellement les boues vers le centre, et identique à ceux utilisés sur les décanteurs statiques (page 643).

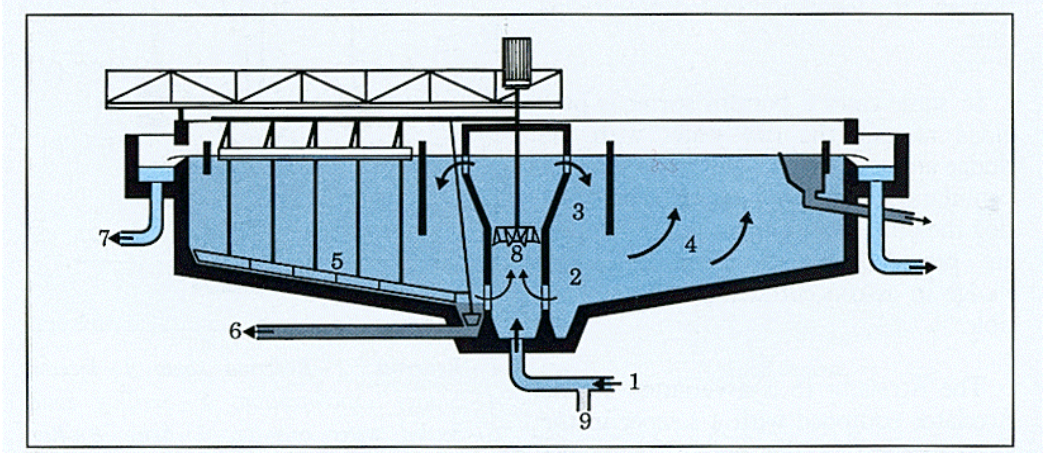
3.2.2.3. Décanteur TURBOCIRCULATOR

Dans cet appareil (figure 341), la recirculation des précipités formés est assurée par une hélice au profil spécialement étudié. Cette hélice évite la détérioration des précipités fragiles d'hydroxyde métallique qui ne résisteraient pas à une reprise par éjecteur hydraulique; elle permet d'utiliser l'appareil aussi bien en clarification qu'en adoucissement, en acceptant des variations de débit importantes et des vitesses maximales comparables à celles du CIRCULATOR.

La zone de réaction, située au centre de l'appareil, permet une parfaite maîtrise des réactifs de coagulation, floculation, adoucissement ou même d'oxydation. Un système de raclage ramène continuellement vers le centre les boues qui sont alors, soit reprises par le système de recirculation, soit dirigées vers la fosse à boues où elles se concentrent et d'où elles sont extraites par intermittence.

3.2.2.4. Le décanteur CLARICONTACT

Dans cet appareil (figure 343), la recirculation de boues, épaissies et raclées dans la zone de floculation, est assurée par un système de pompes à émulsion d'air, qui permet d'en contrôler la qualité. Le volume et le temps de contact (donc de floculation) sont dimensionnés suivant la nature de l'eau. Un système de raclage permet d'épaissir les boues et de les ramener vers des fosses où elles se



1 – Arrivée d'eau brute. 2 – Recyclage des boues. 3 – Mûrissement du floc. 4 – Zone de décantation . 5 - Racleurs. 6 – boues en excès . 7 – Départ d'eau traitée. 8 – Hélice de mélange eau brute – boues recyclées . 9 –Introduction des réactifs.

Figure 341. Décanteur TURBOCIRCULATOR .

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

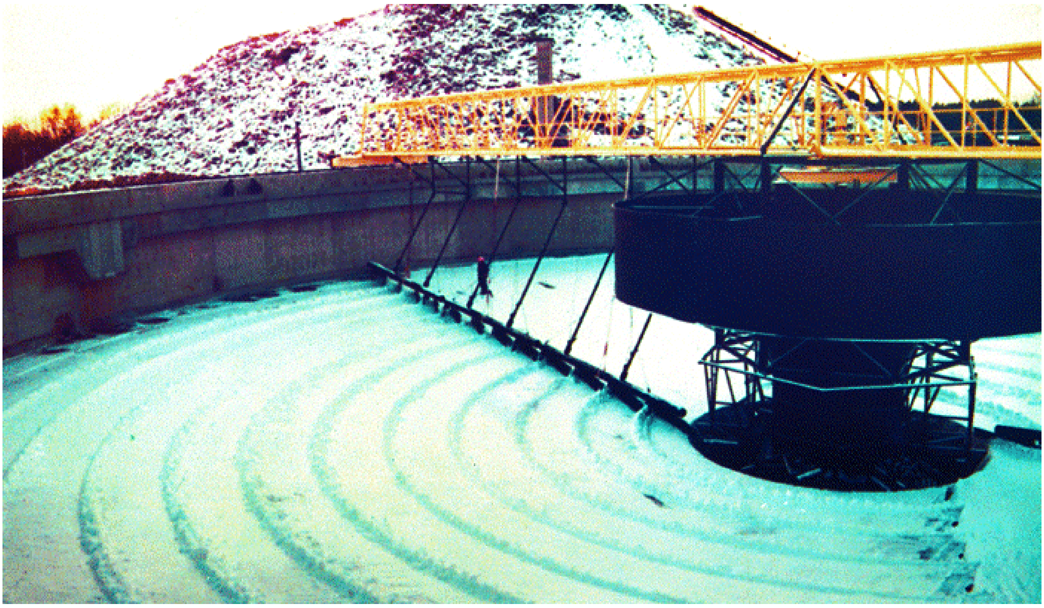


Figure 342. JAMES MACLAREN INDUSTRIES INC. (Canada).
Décantation primaire d'effluents. TURBOCIRCULATOR Ø 55 m.

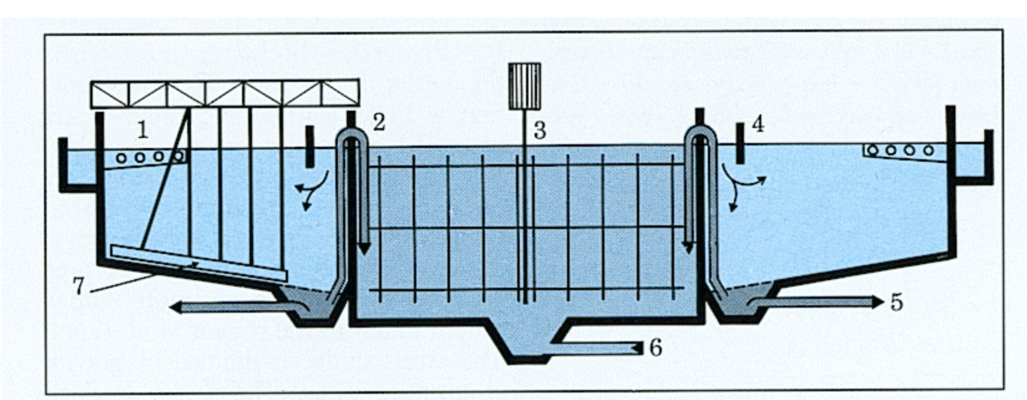
concentrent et d'où elles sont extraites par intermittence.

3.2.2.5. Le décanteur THERMOCIRCULATOR

Cet appareil (figure 344) est utilisé pour la décarbonatation à la chaux, combinée avec le désiliciage à la magnésie, d'eau d'alimentation de certaines chaudières à moyenne pression. Il permet, en outre, d'assurer un dégazage partiel (oxygène).

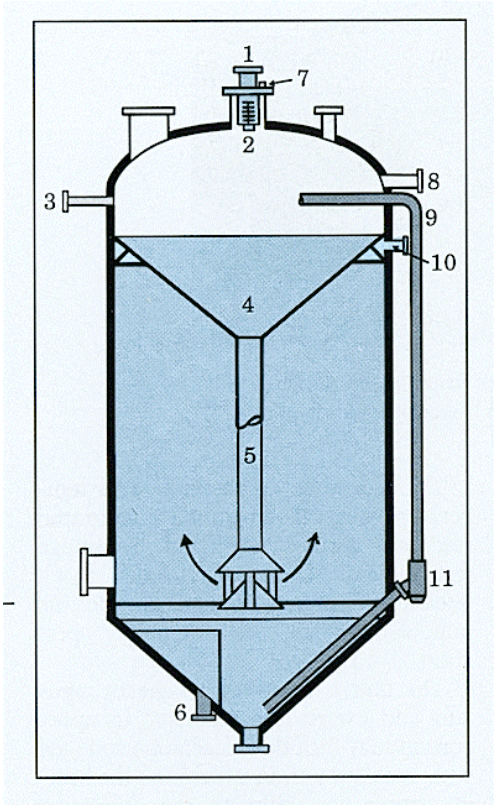
Le traitement s'effectue sous une faible pression, correspondant à la tension de vapeur, pour des températures choisies entre 102 ° à 115 °C suivant les cas. Cette température permet des réactions rapides et complètes, facilitées en outre par une recirculation des boues. Celle-ci est assurée par un émulseur à vapeur, extérieur à l'appareil, dont il est facile de vérifier le fonctionnement.

L'appareil est équipé d'un régulateur de vapeur et d'un régulateur de niveau d'eau. Il peut comporter, à sa partie supérieure, une zone de dégazage alimentée en eau décantée. La vapeur de réchauffage passe alors par la chambre de dégazage avant de venir chauffer l'eau brute.



1 - Goulotte de reprise d'eau décantée. 2 - Pompe à émulsion. 3 - Floculateur. 4 - Jupe de répartition. 5 -Extraction des boues. 6 - Arrivée d'eau brute. 7 - Raclage.
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 343. Décanteur CLARICONTACT.



1 - Arrivée d'eau brute. 2 - Pulvérisateur. 3 -Arrivée des réactifs. 4 -Entonnoir. 5-Cheminée d'écoulement. 6-Tuyauterie d'évacuation des boues. 7 - Sortie des gaz incondensables. 8-Entrée de vapeur de réchauffage. 9-Boues recirculées. 10 - Départ d'eau condensée vers filtration. 11 - Éjecteur de vapeur.

Figure 344. THERMOCIRCULATOR.

3.2.3. Le décanteur-épaississeur DENSADEG

C'est un décanteur à recirculation externe, utilisant le principe de la décantation lamellaire. C'est un décanteur rapide, compact, souple d'emploi. Il est peu sensible aux variations de la qualité et du débit d'eau brute. Il permet la diminution du volume des boues extraites qui peuvent être déshydratées sans épaississeur intermédiaire.

Le DENSADEG RPL est constitué de trois éléments (figure 345).

R - Réacteur: ce réacteur est composé de trois chambres successives. Les deux premières chambres 1 et 2 réalisent la floculation rapide en réacteur agité, au moyen d'une hélice à flux axial (4) qui induit un débit de recirculation interne propre au réacteur. La troisième chambre (3) permet la floculation lente en flux piston. L'eau brute (5) préalablement coagulée est injectée à la base du réacteur agité. Le floculant est introduit (6) à la base de la turbine. Des boues en provenance du prédécanteur-épaississeur sont recirculées par circuit extérieur (7).

La conception de ce réacteur permet une densification importante du floc, et des vitesses ascensionnelles dans la zone de décantation lamellaire pouvant dépasser 20 $m.h^{-1}$ en clarification et 30 $m.h^{-1}$ en décarbonatation.

P - Prédécanteur épaississeur: cet élément assure la décantation de la plus grande partie du flot formé. La partie inférieure est équipée d'une herse (9) d'épaississement et d'un racleur de fond (10). Les boues épaissies sont extraites par une tuyauterie (14) de la fosse à boues. Une partie de ces boues est recirculée dans la tuyauterie d'arrivée d'eau brute (7), ce qui permet (assurer, en permanence, une concentration optimale en boue dans le réacteur. L'excès des boues est évacué gravitairement ou par pompe. Les boues sont suffisamment épaissies pour pouvoir être dirigées vers le système de déshydratation, sans épaississement complémentaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L - Décantation lamellaire : cette chambre de décantation, équipée de modules DEGRÉMONT à section hexagonale (11), assure la décantation du floc résiduel. L'eau décantée est reprise (13) par un réseau de goulottes (12). Suivant la dimension de l'appareil, la collecte des boues est assurée gravitairement ou par raclage (15). Les boues sont extraites en (16) et recyclées en tête du réacteur.

Les domaines d'utilisation du DENSADEG sont particulièrement variés: production d'eau de consommation ou d'eau de procédé (clarification, décarbonatation), traitement des eaux de lavage de filtres, traitement d'eaux résiduaires industrielles (floculation, précipitation) ou urbaines (traitement physico-chimique, traitement tertiaire en déphosphatation...).

Selon la qualité recherchée pour l'eau traitée, on peut faire varier l'importance
relative de la surface de décantation lamellaire et de la surface de préépaississement C'est ainsi que si l'on recherche uniquement l'épaississement des matières en suspension contenues dans l'eau à traiter, sans rechercher la meilleure qualité de l'eau décantée, on peut utiliser un appareil sans zone lamellaire (DENSADEG RP). C'est par exemple le cas du traitement des eaux de lavage des filtres, lorsque l'installation ne comporte pas de décanteur dans la ligne de traitement: coagulation sur filtre, déferrisation biologique. C'est aussi le cas du traitement d'eaux d'exhaure de mines, et de certaines ERI. Si, au contraire, c'est la qualité de l'eau décantée qui est l'objectif prioritaire, et que l'on ne recherche pas un épaississement maximal des boues, on peut utiliser le DENSADEG RL (figures 346 et 347)

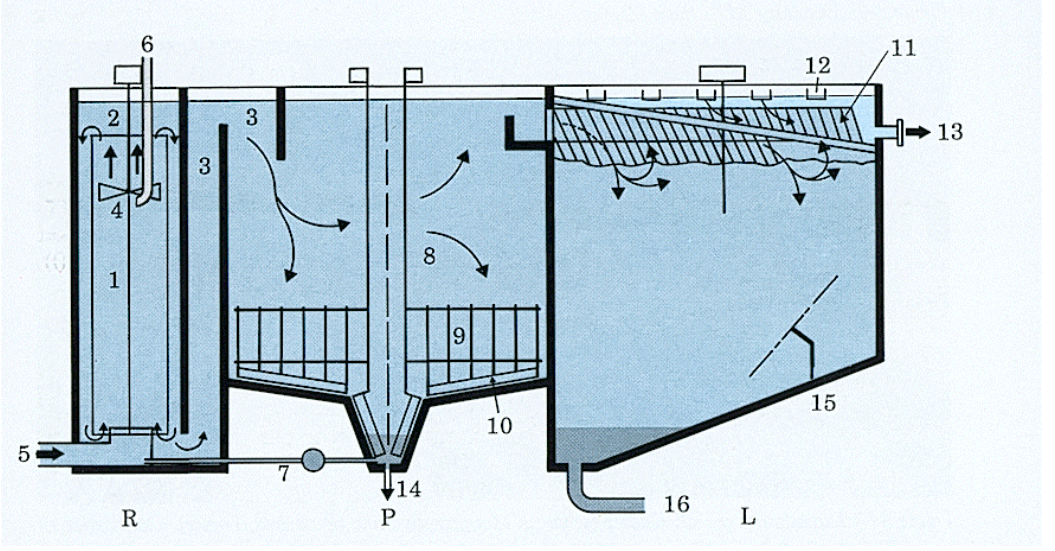
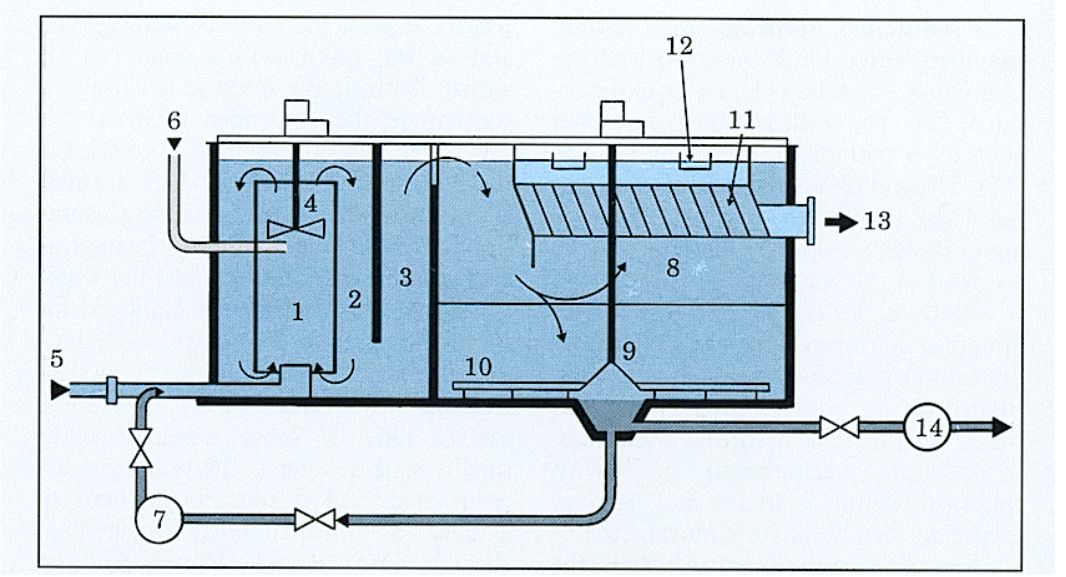


Figure 345. Décanteur DENSADEG RPL. Schéma de principe.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1,2,3 - Chambres de floculation.
4 - Hélice.
5 - Arrivée d'eau brute.
6 - Injection des réactifs.
7 - Pompe de recirculation.
8 - Entrée d'eau floculée.
9 - Arbre d'entraînement.
10 -Racleur. 11 - Modules.
12 -Goulottes de reprise.
13 - Sortie d'eau traitée.
14 - Pompe d'extraction des boues.

Figure 346. DENSADEG RL - Schéma de principe.

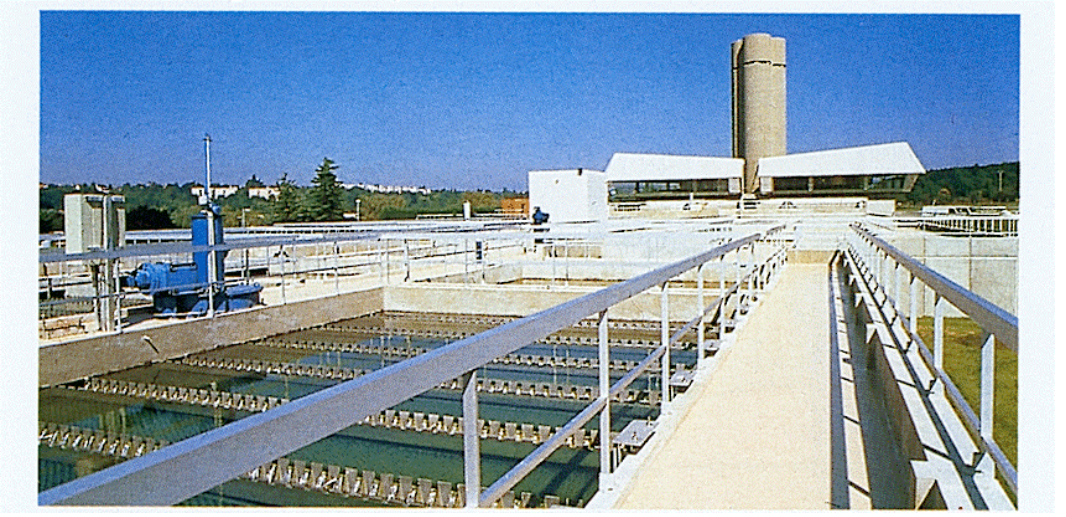


Figure 347. Extension de l'installation LE de MORSANG-SUR-SEINE (Essonne). Clarification d'eau de Seine. Débit: 3 800 $m^3.h^{-1}$. Décanteur DENSADEG RL. Vitesse de décantation dans la zone lamellaire: 22,5 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le DENSADEG peut être construit en version métallique (figure 348).

Figure 348. Installation de FRANKEN II (RFA). Débit: 150 $m^3.h^{-1}$. Clarification d'eau de rivière pour la production d'eau de procédé. Décanteur DENSADEG métallique.

3.3. DÉCANTEUR A MASSE DE CONTACT GRANULAIRE LE GYRAZUR

La différence essentielle avec les appareils de précipitation à contact de boue réside dans l'utilisation de germes de plus grande dimension. Alors que dans les appareils précédents la taille des cristaux élémentaires de carbonate de calcium est de l'ordre de 1/100e de mm, on utilise ici une masse dite "catalysante", constituée généralement de grains de sable de dimension initiale comprise entre 0,2 et 0,4 mm, contenue dans un appareil de forme conique. Le carbonate de calcium précipite en cristallisant à la surface des grains entre lesquels la percolation ascendante de l'eau s'effectue à grande vitesse. La grande quantité de grains assure une réaction rapide et complète.

Ces appareils présentent trois avantages
-faible encombrement,
- possibilité de fonctionner sous pression; en les combinant avec des filtres fermés, il permettent de décarbonater une

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

eau sans rupture de la charge hydraulique,

- obtention, au lieu de boues, de billes de l'ordre de 1 à 2 mm de diamètre, s'essorant très rapidement.

La décarbonatation catalytique étant une cristallisation du carbonate de calcium de l'eau avec la masse catalysante-support, tout agent dispersant doit être évité. Elle ne peut être mise en œuvre pour des eaux contenant trop de colloïdes, de fer ou de magnésie. Pour éviter la précipitation de magnésie, le titre magnésien (T Mg) de l'eau brute doit vérifier la relation T Mg < TH - TAC.

Le GYRAZUR permet de restituer une eau décarbonatée contenant peu de MES, celles-ci étant essentiellement liées aux impuretés de la chaux utilisée (incuits).

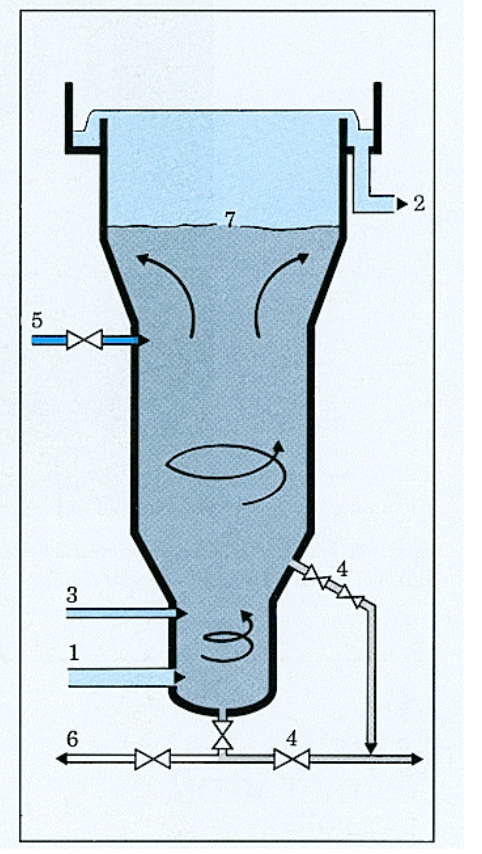
Le GYRAZUR (figure 349) est un appareil métallique qui se compose d'un empilement de trois cylindres, de diamètre croissant de la base au sommet, reliés entre eux par des troncs de cône. Cette forme permet "de doubler" pratiquement la masse catalysante par rapport à un appareil conique classique de même diamètre supérieur et de même hauteur.

L'eau brute est introduite horizontalement et tangentiellement en (1) dans le cylindre inférieur, de manière à imprimer un mouvement ascendant hélicoïdal mettant en expansion et en mouvement la masse catalysante

La chaux est introduite en (3), sous forme de lait de chaux très dilué ou d'eau de chaux, directement dans la masse catalysante, à un niveau légèrement supérieur à l'entrée d'eau brute et dans une zone très agitée facilitant un mélange rapide.

L'eau traitée, séparée de la masse catalysante dans le cylindre supérieur (7), est collectée au sommet de l'appareil et évacuée en (2).

Le grossissement des grains de la masse catalysante étant continu, il est nécessaire d'évacuer périodiquement, . par la base de l'appareil en (4), les grains les plus gros, et d'introduire en (5) des germes fins pour les remplacer.



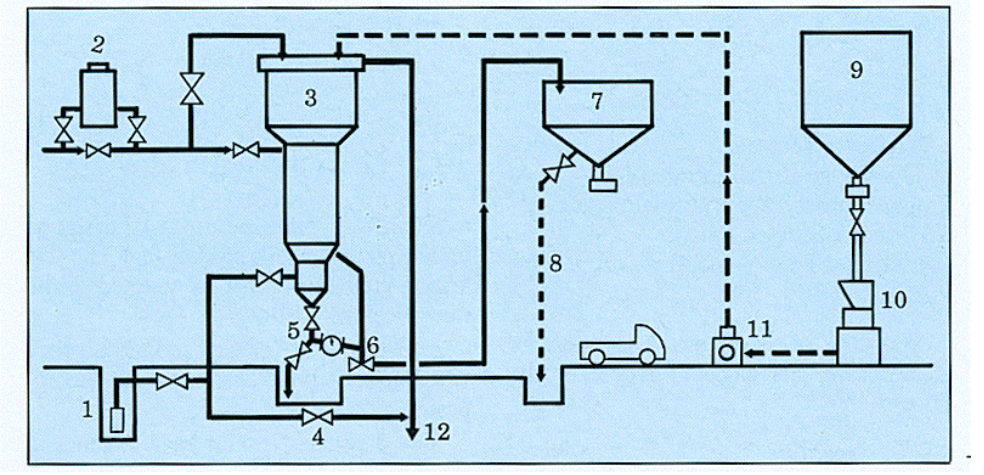
1 - Entrée d'eau à traiter.
2 - Sortie des eaux traitées.
3 - Injection de réactif
4 - Évacuation de la masse catalysante.
5 -Introduction des germes fins.
6 - Vidange.
7 - Niveau supérieur de la masse catalysante.
Figure 349. Réacteur GYRAZUR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Des vitesses élevées, de 30 à 70 $m.h^{-1}$,sont possibles dans la zone de séparation. La gamme de ces appareils permet de traiter des débits unitaires de 50 à 2000 $m^3.h^{-1}$

Le GYR.AZUR peut également être utilisé pour la décarbonatation à la soude caustique.

La figure 350 rend compte du schéma d'installation.



1 - Relevage d'eau brute. 2 - Pot de chargement du sable. 3 - GYRAZUR. 4 - By-Pass. 5 - Vidange. 6 -Éjecteur. 7 - Silo de stockage des billes. 8 - Extraction des billes. 9 - Silo de chaux. 10 - Doseur volumétrique. 11 - Pompe doseuse. 12 - Départ d'eau traitée.
Figure 350. Installation de décarbonatation avec GYRAZUR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 351. Installation LE de VILLENEUVE-LA -GARENNE (Hauts-de-Seine). Débit maximal: 1800 $m^3.h^{-1}$. Décarbonatation d'eau souterraine avec réacteur GYRAZUR. Vue sur la base de 1'appareil avec injection des réactifs.

3.4. DISPOSITIFS D'ÉVACUATION DES BOUES

3.4.1. Collecte interne

- **Sans raclage**

Les boues sont concentrées par gravité dans des trémies

- uniques (décanteurs statiques simples, SEDIPAC métalliques...),
- multiples (ACCELERATOR, PULSATOR..).

La pente des parois des trémies doit être supérieure à la pente naturelle de talutage des boues.

- **Avec raclage**

Les boues de fond sont dirigées par un dispositif de raclage vers une (ou des) fosses) de reprise, dessinées) de manière à éviter les dépôts. Dans certains cas, comme les décanteurs rectangulaires de grande largeur, la fosse elle-même doit être équipée d'un racleur, car il est impossible, pour des raisons économiques, de lui donner une pente suffisante pour l'écoulement naturel de la boue.

Les systèmes suceurs permettent une collecte des boues sans trémie.

3.4.2. Reprise

Elle peut se faire gravitairement, à condition que la charge disponible soit suffisante et que la nature des boues (viscosité, thixotropie, texture...) le permette. Dans les autres cas, les boues doivent être reprises directement par pompe, éventuellement avec un recyclage.

Une possibilité de reprise directe, sans trémie ni raclage, est offerte par des dispositifs suceurs totalement immergés, automoteurs, à déplacement multidirectionnel, commandés par automate.

L'extraction des boues est discontinue, à l'exception de quelques cas particuliers:

- recirculation externe,
- risques importants de bouchage.

3.4.3. Dispositions générales

Les lignes de soutirage de boues doivent être conçues de manière à écarter les risques de bouchage. Les règles suivantes doivent être adaptées aux types de produits

- assurer une vitesse suffisante, au moins périodiquement, pour empêcher les dépôts,
- ne pas installer de tuyauteries de diamètre trop petit,
- tracer des conduites les plus rectilignes possibles,
- réduire les longueurs à l'aspiration des pompes,
- ne mettre en oeuvre des reprises par tuyauteries perforées que pour des longueurs faibles et des boues très fluides,
- prévoir des possibilités de vidange et de rinçage des canalisations (eau et air comprimé) ou même de ringardage mécanique (sidérurgie).

La figure 352 donne deux exemples de réalisations pour des boues d'eaux résiduaires industrielles concentrées, dans les cas d'une reprise

- directe,
- avec fosse de stockage intermédiaire. Cette disposition permet un contrôle visuel, et des débits instantanés différents entre l'extraction du décanteur et l'évacuation des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. Les décanteurs

ORGANES	UTILISATION	REMARQUES
OBTURATEURS		
Vannes à manchon	Toutes boues	Choisir le manchon en fonction de sa tenue aux agents chimiques
Vannes à boisseau sphérique ou conique	Boues industrielles	Boisseau conique utilisé pour les boues abrasives
Vannes téléscopiques	boues d'ERU	Écoulement visible
Vannes papillon	Boues d'EP	Passage non intégral Pour grands diamètres et boues très fluides
Siphons	Décanteurs à succion	Évitent les traversées de parois et les vannes d'isolement
POMPES		
A vortex	Boues de toute nature	Sauf concentrations élevées
A rotor excentré	Boues concentrées	
A membrane	Boues concentrées refoulées à forte pression	
Vis d'Archimède	Boues activées	Grands débits
A émulsion	Boues peu concentrées abrasives	Faibles hauteurs de relèvement. Tolèrent le passage de corps volumineux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.4.5. Automatisation

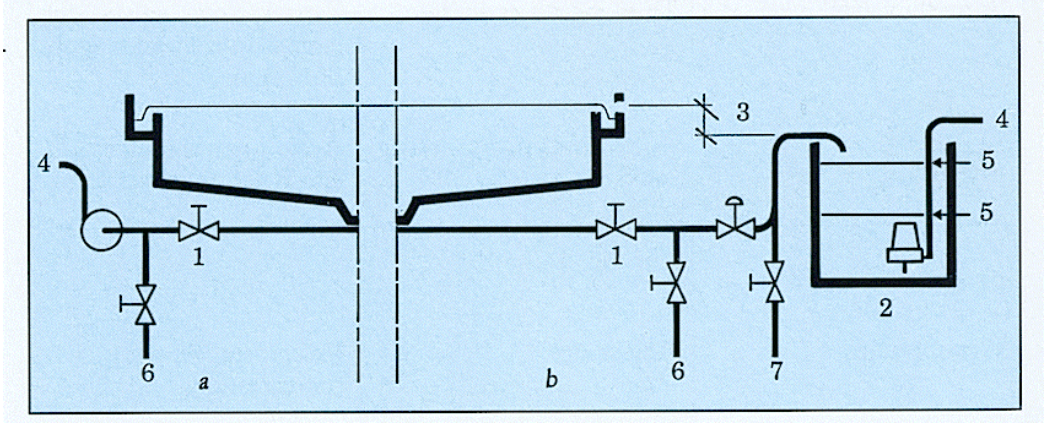
Les extractions de boues étant presque toujours discontinues, il est intéressant de les automatiser. Suivant les applications, les asservissements peuvent être réalisés de différentes manières

- par l'intermédiaire d'une minuterie cadence/durée (surtout lorsque le débit traité est constant et si la concentration des boues extraites a peu d'importance),
-proportionnellement au débit (modulation de la cadence des extractions de durée constante),
- en fonction de la concentration des boues (mesurée par une sonde à ultrasons ou évaluée à partir d'une mesure de l'effort de raclage),
- à partir du niveau des boues dans ledécanteur (détecté par sonde à ultrasons ou sonde optique),
- etc.

La description des automatismes est développée dans le chapitre 21, page 1130.

3.4.6. Écumes

Le plus souvent, les matières flottant à la surface doivent être séparées des boues. En général, elles sont dirigées par le dispositif de raclage de surface vers une trémie ou une goulotte en communication avec une fosse dans laquelle elles sont concentrées. Le profil et le diamètre de la liaison doivent être adaptés à la nature collante de ces produits; des dispositifs de nettoyage automatique sont souvent prévus.



1 - Vanne d'isolement.
2 - Fosse intermédiaire.
3 - Charge nécessaire sur la tuyauterie d'extraction.
4 - Départ des boues extraites.
5 -Détecteur de niveau.
6 - Fluide de décolmatage.
7 - Vidange des tuyauteries verticales.

Figure 352. Exemples de reprise de boues en ERl: a - directe. b - avec fosse intermédiaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. LES FLOTTATEURS

4.1. TECHNOLOGIE GÉNÉRALE

Les flottateurs peuvent être circulaires ou rectangulaires. Cette dernière forme est généralement réservée au traitement des eaux de consommation car elle permet la réalisation harmonieuse d'ensembles monoblocs en réunissant le floculateur, le flottateur et les filtres avec une emprise au sol minimale.

Si nécessaire, des essais préalables peuvent être réalisés à l'échelle du laboratoire

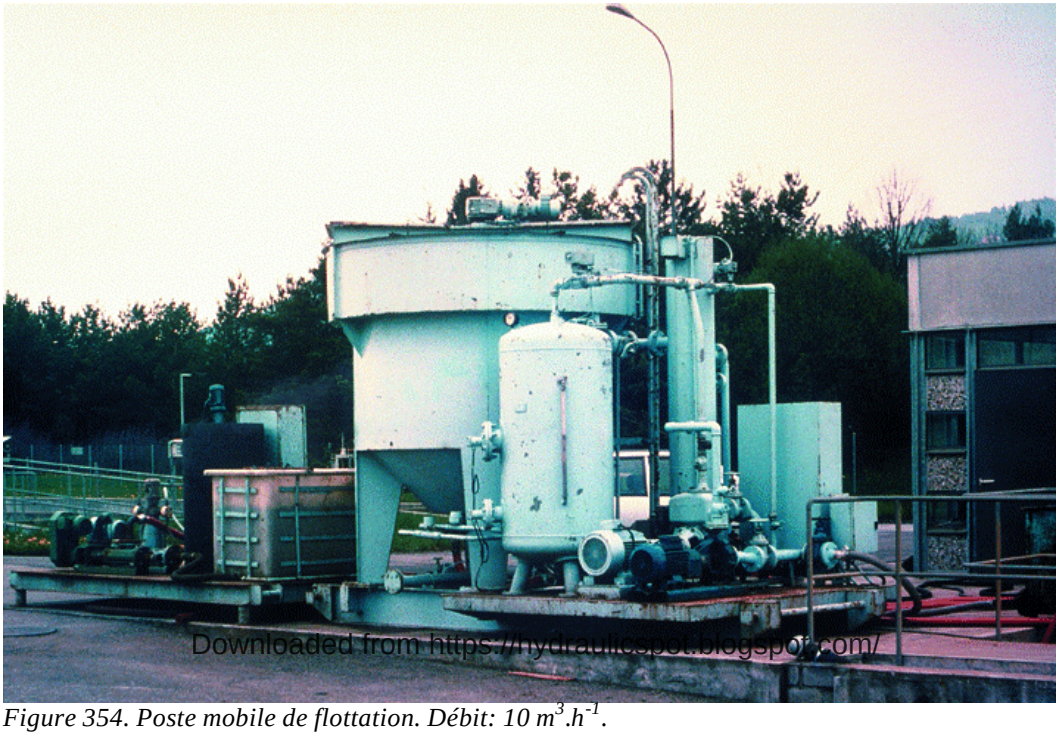
Figure 353. Flottatest.

(FLOTATEST, figure 353) ou à l'échelle du pilote semi-industriel (figure 354).

Sur le plan hydraulique et surtout pour le traitement des eaux à forte concentration en matières en suspension, le flottateur de forme circulaire est avantageux par rapport au flottateur rectangulaire: à capacité égale, la distance entre le haut de la chambre de mélange eau/bulle d'air et le bas de la cloison siphoïde est plus faible et la répartition des bulles presque uniforme peut être maintenue sur toute la section horizontale de l'appareil.

4.1.1. Description générale d'un poste de flottation

Le principe de fonctionnement décrit dans la figure 355 s'applique aussi bien à un flottateur circulaire que rectangulaire. L'eau à traiter (11), préalablement floculée (ou non) à l'aide de réactifs (12) dans un floculateur (13), est introduite dans une chambre



Downloaded from https://hydraulic.spot.blogspot.com/

Figure 354. Poste mobile de flottation. Débit: 10 $m^3.h^{-1}$.

de mélange (1) où elle est mise en contact avec de l'eau pressurisée et préalablement détendue (9), entraînant la formation de fines bulles d'air (ou de gaz) qui viennent se fixer sur les particules solides. L'attelage particule/bulle, de densité inférieure à l'eau, se sépare dans la zone (2) et vient s'accumuler en surface. La boue ainsi constituée est collectée par un système de raclage (3) avant d'être évacuée par une goulotte (4). L'eau séparée des particules est reprise sous une cloison siphoïde (5) avant d'être collectée et évacuée en (6).

L'eau pressurisée est obtenue

- soit par **pressurisation indirecte:** une partie de l'eau traitée est recyclée (7) et mise en contact avec de l'air (ou gaz) sous pression (14) dans un ballon de pressurisation (8),
- soit par **pressurisation directe:** la totalité du liquide à traiter est pressurisée.

L'eau pressurisée est introduite dans la chambre de mélange (1).

Pour certaines applications et pour de grands diamètres, le flottateur est équipé d'un racleur de fond, pour faciliter l'évacuation en (10) des boues éventuellement déposées sur le radier.

Remarques :

a) La chambre de mélange a deux buts

- mettre en contact l'eau à traiter et l'eau pressurisée,
- disperser l'énergie cinétique du mélange avant son introduction dans la zone de séparation.

b) La couche de boue en surface peut atteindre, dans certains cas, plusieurs dizaines de centimètres et être extrêmement stable (épaississement de boues activées). Dans d'autres cas elle est plus mince et/ou plus fragile (flottation de flocs d'hydroxydes métalliques ou d'huiles).

c) Le nombre de lames racleuses en surface est conditionné par leur vitesse

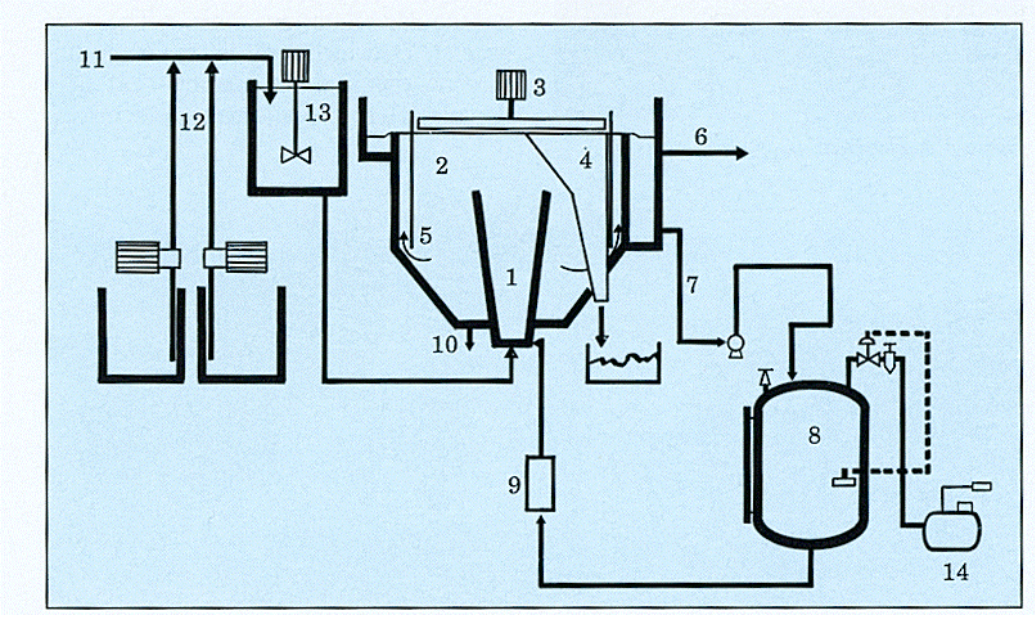


Figure 355. Schéma de principe d'une installation de flottation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

d'avancement, la distance entre deux lames et la quantité des boues à évacuer. Il faut éviter tout risque de désaération ou désagrégation de la boue.

4.1.2. Ballons de pressurisation

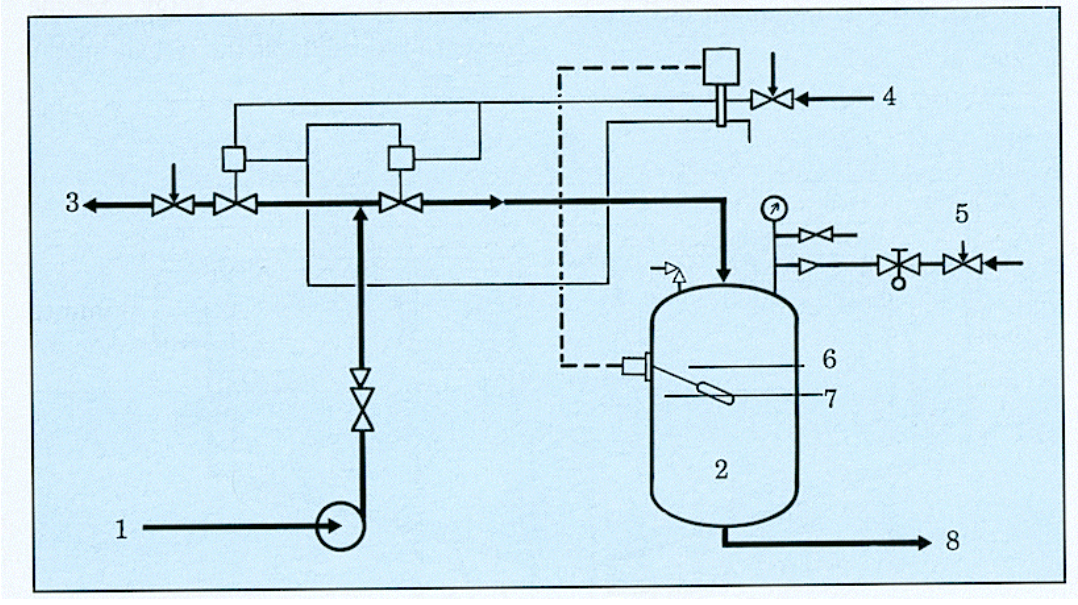
Ces appareils de dissolution de gaz sont, suivant les applications, métalliques galvanisés ou avec une protection interne. Ils peuvent être verticaux ou horizontaux.

Les appareils standard DEGRÉMONT présentent un temps de contact de quelques dizaines de secondes (maximum: une minute) et sont verticaux pour des capacités inférieures à 300 $m.h^{-1}$ environ.

Différents types de régulation évitent que le gaz de pressurisation ne s'évacue directement dans le flottateur. La figure 356 montre un exemple de réalisation très souvent utilisée pour sa simplicité.

4.1.3. Reprise des boues flottées

La reprise des boues flottées depuis la fosse de réception peut nécessiter une désaération avant pompage. Les pompes doivent être en charge.



1-Eau à pressuriser.
2-Ballon de pressurisation.
3 -Recyclage.
4-Air "contrôle".
5-Air comprimé.
6-Contact niveau haut.
7-Contact niveau bas.
8-Eau pressurisée.
Figure 356. Schéma de poste de pressurisation.

4.2. FLOTTATEURS CIRCULAIRES

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2.1. FLOTAZUR BR

Le FLOTAZUR BR, métallique, est normalisé jusqu'à des diamètres de 8 m. Il est équipé d'un double dispositif de raclage, de surface et de fond (figure 357).

Suivant les applications et le diamètre, le FLOTAZUR BR dispose de 2 à 6 lames racleuses de surface (1) et une seule de fond (2). L'ensemble est entraîné par un

motoréducteur central (3) relié à la pièce centrale (5) par une articulation (4) et reposant à l'autre extrémité sur un galet (6) qui se déplace sur un chemin de roulement. Le racleur de fond est suspendu à un des bras-racleurs.

La goulotte de réception des boues de surface (7), de grande longueur, comporte une rampe d'accès dont la partie ascendante a un profil gauche de manière à assurer en tout point un contact avec la lame racleuse. Sur la partie arrière, des guides inclinés facilitent une pénétration progressive de la lame racleuse dans l'eau sans remous préjudiciables.

4.2.2. SÉDIFLOTAZUR

Le SÉDIFLOTAZUR, construit en béton, est normalisé jusqu'à 2 0 m de diamètre. Le raclage est identique dans son principe à celui du FLOTAZUR BR. Il s'en différencie par le fait que l'ensemble de raclage est tiré par une passerelle à entraînement périphérique sur laquelle est fixé le racleur de fond.

A partir de 15 m de diamètre, les appareils comportent deux goulottes d'évacuation de boue diamétralement opposées. Ceci pour réduire le temps de séjour de la boue à la surface (phénomène de désaération) et, surtout, éviter l'engorgement devant la goulotte.

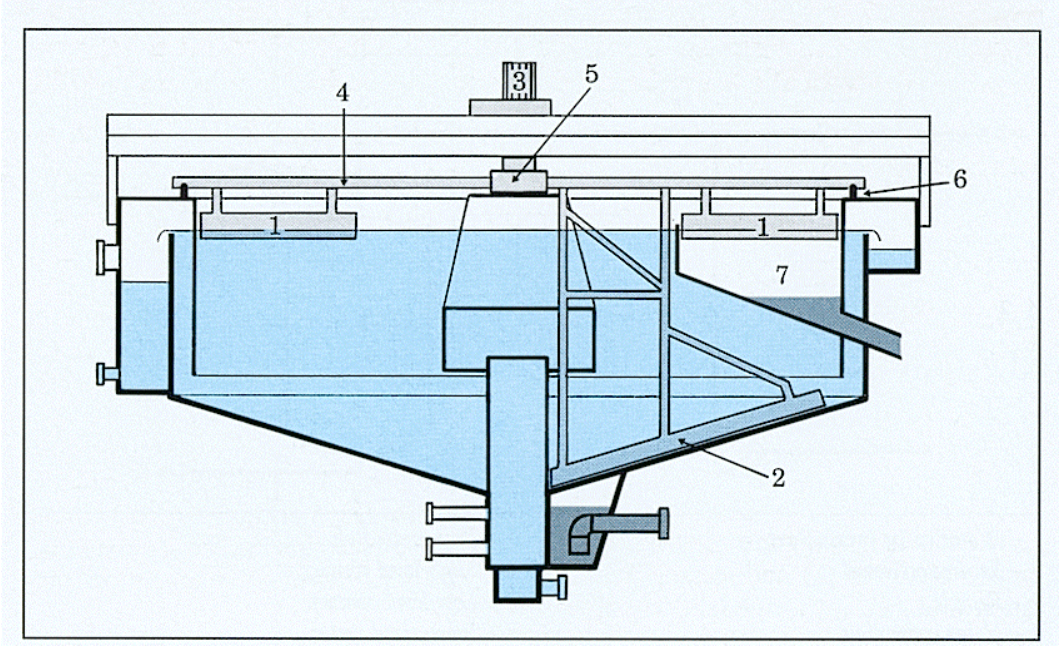


Figure 357. FLOTAZUR BR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 358. Installation de BARRANCA BERREJA (Colombie) pour ECOPETROL. Débit: 3 000 $m^3.h^{-1}$. Flottation d'eaux huileuses. 4 SÉDIFLOTAZUR Æ 15 m.

4.3. APPAREILS RECTANGULAIRES

4.3.1. FLOTAZUR P

Le FLOTAZUR P (figure 359) est la combinaison d'un floculateur (1) et d'un flottateur (2) de forme rectangulaire. Il est particulièrement bien adapté au traitement d'eaux peu chargées, conduisant à un floc léger et fragile: La vitesse ascensionnelle est de 5 à 8 $m.h^{-1}$ avec des pourcentages d'eau pressurisée variant de 6 à 12 %.

Après un temps de séjour de 15 à 30 min dans un ffoculateur équipé d'agitateurs lents comportant normalement deux compartiments, l'eau entre directement dans des pots de mélange (3) disposés en parallèle, où elle est mise en contact avec l'eau pressurisée (4). La boue flottée est évacuée à l'extrémité opposée (7) par un pont racleur (5) animé d'un mouvement de va et-vient permettant de racler la portion du bassin où la boue s'épaissit (environ le tiers ou la moitié) sans perturber la zone d'expansion au-dessus des pots de mélange. Suivant la dimension des bassins, le pont racleur est entraîné par un piston pneumatique (6) ou un moteur électrique. Il est possible d'installer un racleur à chaînes.

Ces a ?pareils sont normalisés jusqu'à 120 m de surface et ne sont normalement pas équipés de racleur de fond.

4.3.2. FLOTAZUR L

Cet appareil (figure 361) est destiné principalement à des eaux très chargées et nécessitant des taux de recyclage d'eau pressurisée élevés. Il est cependant d'usage moins courant dans ce domaine que les appareils circulaires.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

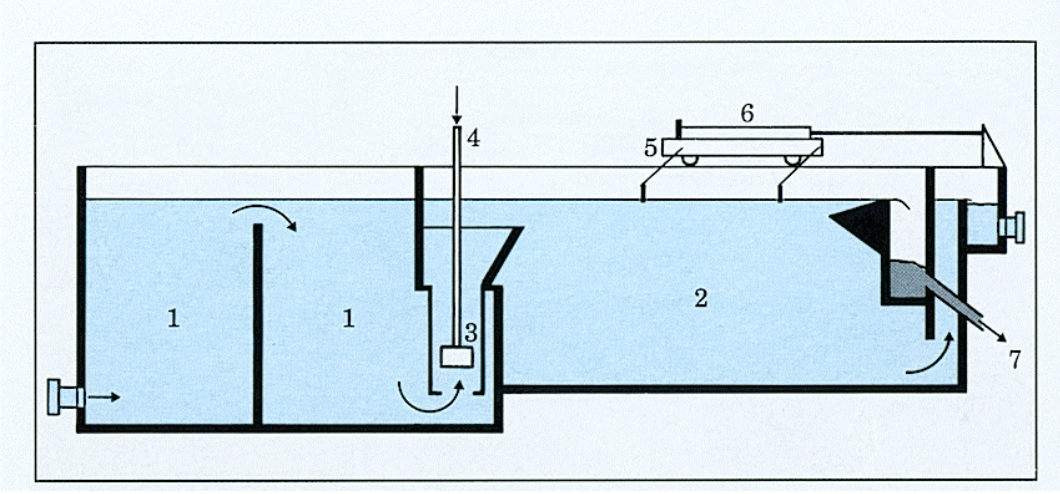


Figure 359. FLOTAZUR P.

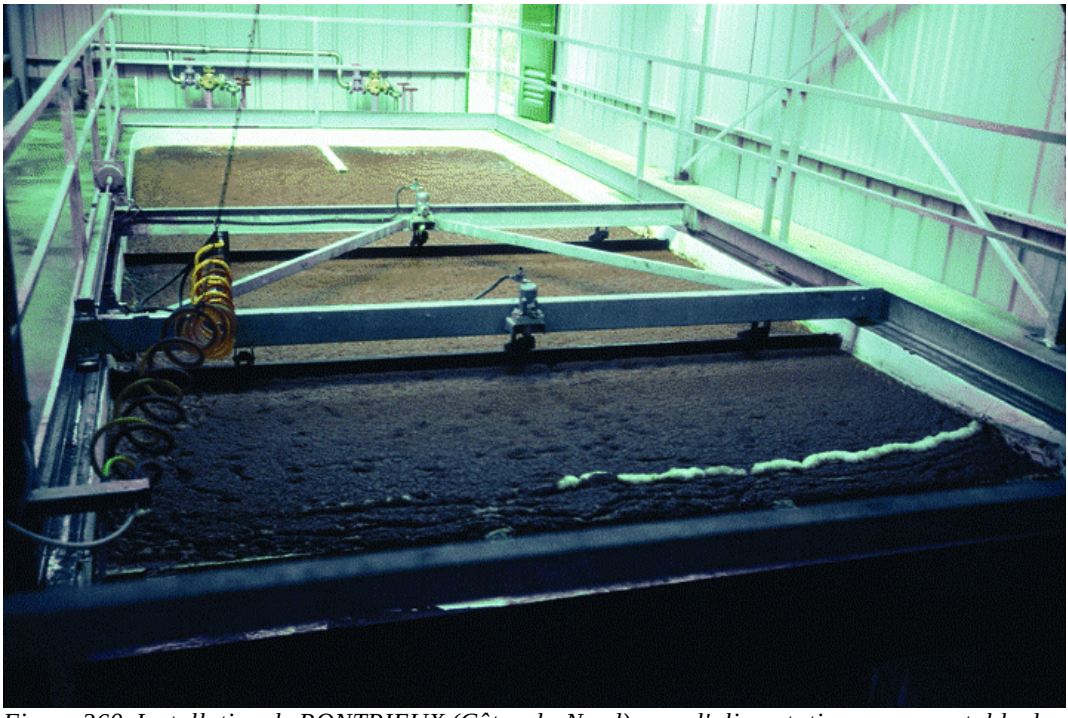
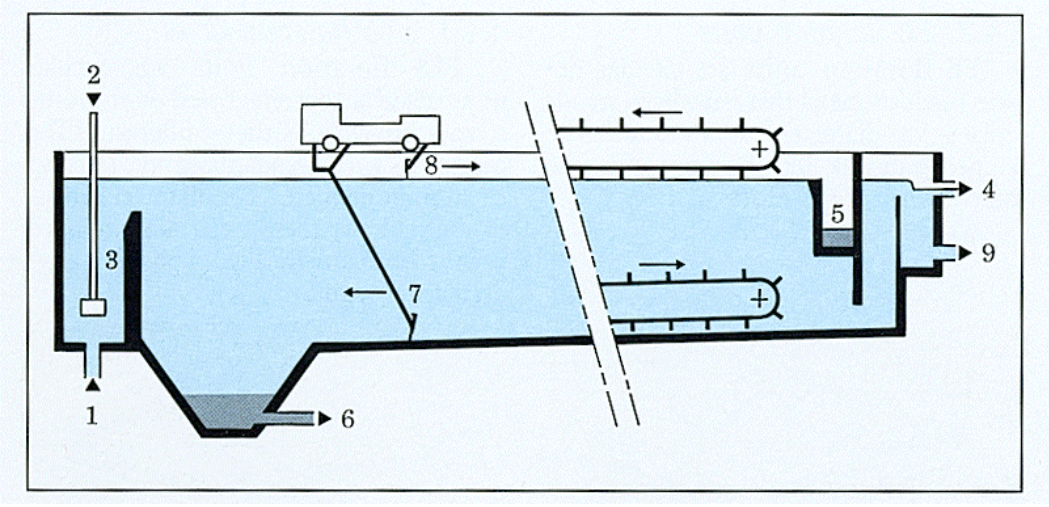


Figure 360. Installation de PONTRIEUX (Côtes-du-Nord) pour l'alimentation en eau potable du Syndicat de LA RIVE. Débit: 200 $m^3.h^{-1}$. Clarification d'eau de rivière par flottation. Vue sur les boues et le système de raclage du FLOTAZUR P, surface 27 m^2.

Le FLOTAZUR L conserve les mêmes dispositions de mélange des eaux à traiter et pressurisées que le FLOTAZUR P . Le système de raclage évacue les écumes . de surface et, si nécessaire, les boues de fond (raclage par chaîne ou par pont).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Arrivée d'eau brute.
2 -Arrivée d'eau pressurisée.
3 -Zone de mélange.
4 - Sortie d'eau traitée.
5 - Sortie des flottants.
6 - Extraction des boues.
7 - Raclage de fond.
8 - Raclage de surface.
9 -Eau recyclée vers pressurisation.
Figure 361. FLOTAZUR L.

4.4. FLOTTATEURS POUR L'ÉPAISSISSEMENT DES BOUES

4.4.1. Généralités

Pour traiter les eaux à forte concentration en MES (plusieurs grammes par litre), la flottation est mise en oeuvre dans des appareils se caractérisant essentiellement par :

- un pot de mélange spécialement adapté,
- une plus grande hauteur, permettant un stockage important de la boue sur plus de 80 cm, ce qui optimise son épaississement,
- un système de raclage comprenant un grand nombre de bras racleurs,
- des goulottes d'évacuation des boues aménagées de façon à augmenter le volume de boue évacué à chaque passage de bras racleur,
- la possibilité d'ajouter une couverture anti-odeurs fixée sur les bras racleurs.

Dans ce type de traitement, on utilise généralement la technique de la **pressurisation directe.**

Bien que la forme rectangulaire puisse être utilisée, la forme circulaire permet d'obtenir des appareils plus performants, surtout dans les grandes dimensions, avec des équipements simples, d'entretien très réduit

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.4.2. Flottateurs FE

Le **flottateur FE** est un appareil circulaire métallique et normalisé jusqu'à des diamètres de 8 m. Le raclage est identique dans son principe à celui du FLOTAZUR BR.

4.4.3. Flottateurs FES

Le **flottateur FES** est un appareil circulaire construit en béton, dont le raclage est identique son principe à celui du dans son principe à celui du SEDIFLOTAZUR. Il est normalisé jusqu'à 20 m de diamètre. A partir de 15 m de diamètre, les appareils comportent deux goulottes d'évacuation de boue diamétralement opposées.

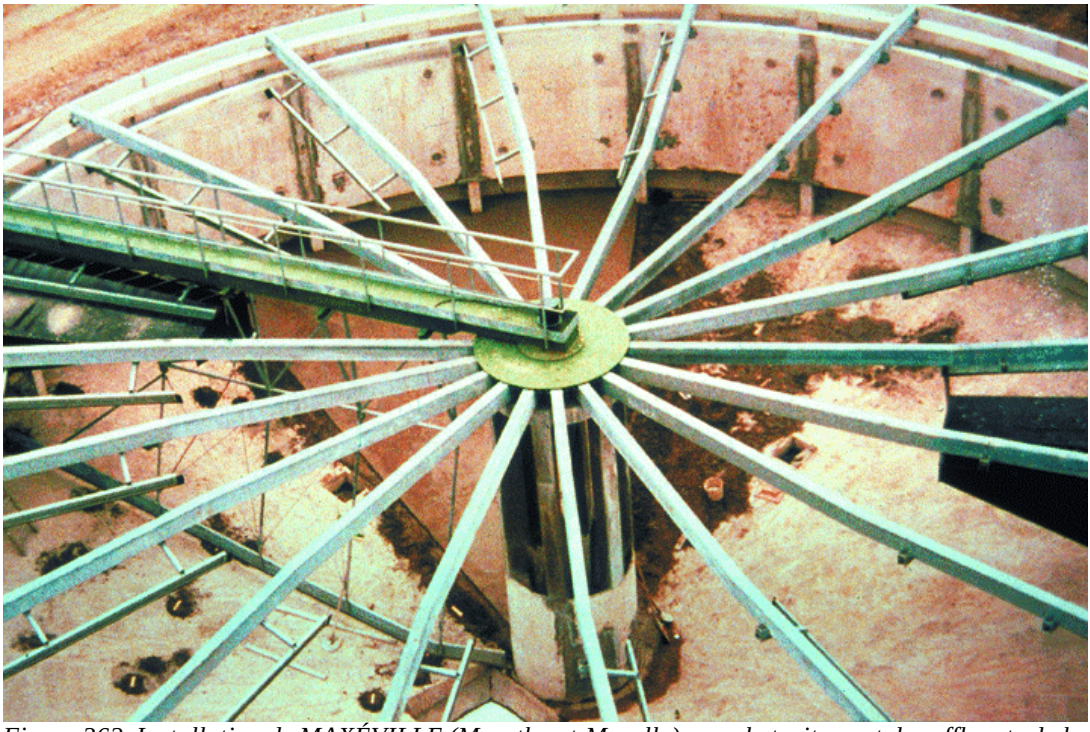


Figure 362. Installation de MAXÉVILLE (Meurthe-et-Moselle) pour le traitement des effluents de la Grande Brasserie de CHAMPIGNEULLES. Débit: 600 m^3 h^{-1}.

Un des 2 flottateurs Æ 20 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

11
PROCÉDÉS BIOLOGIQUES AÉROBIES

1. BOUES ACTIVÉES

1.1. CHARGE D'UNE INSTALLATION ET CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT

Le rendement épuratoire d'une installation de boues activées dépend simultanément de deux facteurs

- la fixation, par adsorption et oxydation, des éléments polluants par la masse bactérienne (ou floc biologique),
- la bonne séparation de ce floc et de l'eau interstitielle épurée.

Dans le réacteur de boues activées, la masse bactérienne est accumulée grâce au recyclage des boues; l'âge de la boue croît donc avec la quantité de biomasse disponible et a plutôt un effet ralentisseur sur l'activité bactérienne; toutefois, dans la phase de développement (voir page 297) où se trouve la plus grande partie de la flore bactérienne, cet effet n'est pas prédominant et, de façon générale, la quantité de pollution retenue est d'autant plus importante que la masse bactérienne est élevée.

Pour l'élimination en continu de la pollution carbonée soluble le rendement d'épuration est d'autant plus élevé que la **charge massique** (voir page 296) est faible et l'âge des boues élevé. Il peut ne pas en être de même pour une nitrification ou une déphosphatation concomitantes.

On classe ainsi les procédés d'épuration par boues activées en familles. Toutefois, il est habituel d'associer ces différents procédés non seulement à une charge massique mais également à une **charge volumique** et cela pour deux raisons

- les impératifs de la clarification - le plus souvent réalisée par décantation imposent de ne pas dépasser des concentrations maximales en MES ($g.l^{-1}$) de la liqueur de boues activées. Aux limites de la charge massique correspondent donc des limites de la charge volumique en $DB0_5$ ou DCO ($kg/m^3.j$) calculée sur le volume du réacteur biologique;

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- un temps minimal de séjour dans le réacteur biologique est nécessaire pour faciliter les phénomènes d'adsorption et pour tamponner l'effet des pointes, particulièrement sensible sur des effluents urbains.

Le tableau 76 résume le classement habituel par niveau de charge des procédés d'élimination de la pollution carbonée par boues activées. Les rendements annoncés sont donnés dans l'hypothèse d'une bonne séparation de tous les éléments décantables de la liqueur de boues activées.

Tableau 76. Classement des procédés par boues activées.

Appellation	Charge massique Cm kg DBO_5/kg MES.j	Charge volumique Cv kg DBO_5	Âge des boues en j.	Rendement p d'élimination de la $DB0_5$ sur ERU
Faible charge	Cm < 0,15	Cv < 0,40	10 à 30	? ≥ 90 % Nitrification possible
	Cm < 0,07 (aération prolongée)			
Moyenne charge	0,15 < Cm < 0,4	0,5 < Cv < 1,5	4 à 10	? ~ 80 à 90%. Nitrification possible aux températures élevées
Forte charge	1,2 > Cm > 0,4	1,5 < Cv < 3	1,5 à 4	? < 80

De très fortes charges (Cm > 1, 2) sont parfois mises en oeuvre dans un premier stade de dégrossissage où la pollution est essentiellement éliminée par adsorption et rétention particulaire dans le floc biologique.

Sur des effluents industriels concentrés, les rendements d'épuration sont supérieurs à ceux annoncés ci-dessus.

Il est d'usage de rapporter la charge massique à la masse de boues aérées présentes dans le seul bassin d'aération, car c'est normalement dans ce réacteur que se trouve la plus grande partie des boues activées et que le milieu est aérobie. Toutefois, dans certains procédés, le volume de boues présentes dans le clarificateur peut être du même ordre de grandeur, voire supérieur à celui des boues aérées. La classification précédente doit alors être aménagée.

La figure 363 caractérise l'évolution de l'épuration en fonction de la charge massique.

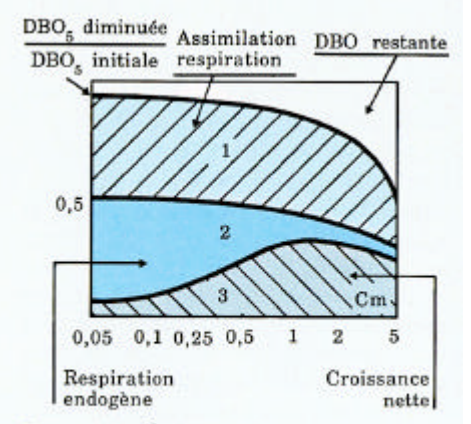


Figure 363. Évolution de l'épuration en fonction de la Cm.

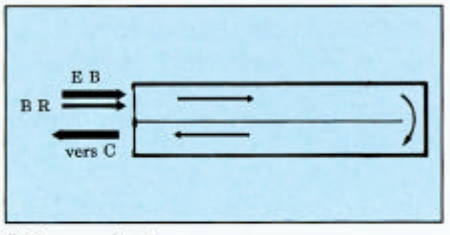
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2. PRINCIPALES DISPOSITIONS DE BASSINS DE BOUES ACTIVÉES

Indépendamment des critères de charge (et d'âge de boues), l'organisation hydraulique du réacteur biologique et des circuits entre réacteur et clarificateur permet de distinguer différents systèmes de traitement par boues activées.

1.2.1. Bassin à flux piston

L'effluent à traiter et les boues recirculées sont admis sensiblement au même point en tête du bassin qui est aménagé de façon à constituer un canal de grande longueur (figure 364).



EB = eau brute.
BR = boues de retour.
C = clarificateur.

Figure 364. Principe du flux piston.

Les concentrations en substrat, les besoins en oxygène de la liqueur de boues activées, varient tout au long de son parcours. C'est pourquoi la puissance d'oxygénation installée est normalement dégressive d'amont en aval (tapered aeration).

Ce type de bassin est le plus ancien. Il est utilisé en particulier en cas de nitrification et s'adapte surtout aux grandes installations. Normalement dimensionné pour d'importants temps de séjour (5 à 6 h au débit moyen) il est parfois utilisé à forte charge avec des temps de séjour de 1 à 2 h, et des concentrations de liqueur en MES de 1 à 2 $g.l^{-1}$ (procédé appelé modified aeration).

Pour toute réaction qui n'est pas d'ordre nul, le réacteur à flux piston permet d'atteindre le meilleur rendement d'épuration. Toutefois, une réalisation hydrauliquement parfaite est impossible et conduirait à des constructions trop coûteuses. Un facteur de dispersion longitudinal est inévitable (voir page 288).

1.2.2. Bassin à mélange intégral

Le but recherché est d'obtenir un réacteur totalement homogène présentant, en tout point, des concentrations identiques en micro-organismes, oxygène dissous et substrat résiduel (figure 365). L'effluent brut est immédiatement dispersé dans le réacteur, et le liquide interstitiel représente l'effluent traité.

Cependant, les dispositions théoriques du mélange intégral sont rarement totalement respectées dans la pratique, en particulier sur les grandes unités. Elles ne sont pratiquement atteintes que dans certaines unités compactes (OXYRAPID). L'avantage du mélange intégral est de bien limiter les surcharges dues aux pointes de pollution (journalières, par exemple).

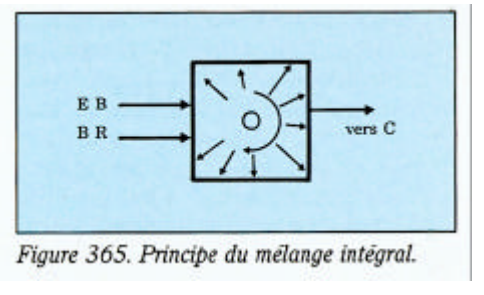


Figure 365. Principe du mélange intégral.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.3. Bassins à boucle fermée

Cette technique (figure 366) se rapproche de celle du mélange intégral. Cependant, la grande longueur relative de la boucle, et la disposition très ponctuelle des aérateurs, conduisent à des variations assez sensibles de la teneur en oxygène dissous tout au long du bassin.

Lorsque les aérateurs utilisés sont de type horizontal, le réacteur est souvent dénommé "chenal d'oxydation". S'ils sont de type vertical, l'appellation "carrousel" est fréquente. Il est toujours possible d'associer plusieurs bassins à boucle en série "s'engrenant" les uns dans les autres.

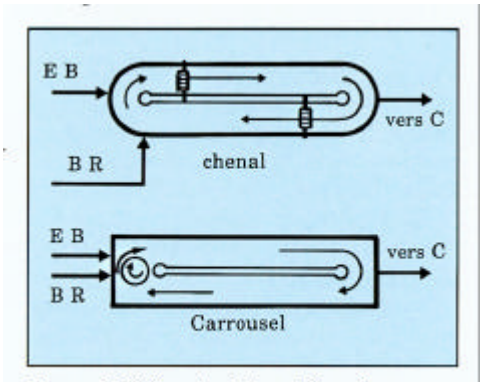
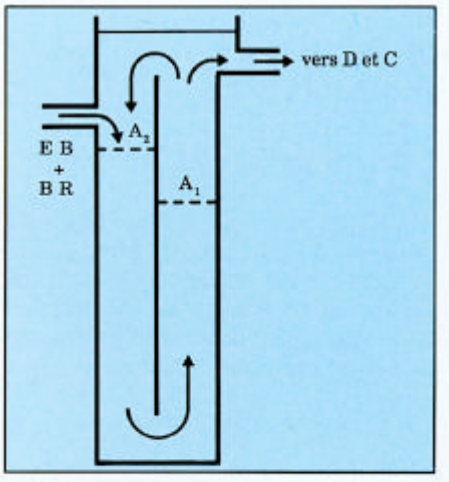


Figure 366. Bassins à boucle fermée.

Il est à signaler un réacteur à boucle fermée de type particulier: le réacteur à puits profond (figure 367). Dans ce réacteur vertical de faible diamètre (en général inférieur à 3 m) et pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de profondeur, on profite de celle-ci pour accroître le rendement de dissolution d'oxygène. L'air est introduit à la fois dans la branche ascendante Al, pour assurer la recirculation externe de la masse liquide dans le plan vertical, et dans la branche descendante AZ. La maîtrise hydraulique du système est difficile.



EB = eau brute.
BR = boues de retour.
D = dégazage.
C = clarification.
A = grille d'injection d'air.

Figure 367. Réacteur à puits profond.

1.2.4. Bassin à cascades

Ce type de réacteur (figure 368) est constitué d'une série de bassins à mélange intégral que la liqueur de boues activées traverse successivement. Il permet de se rapprocher de la cinétique des bassins à flux piston, tout en mettant en oeuvre des réacteurs compacts de construction simple. Il s'adapte très bien aux traitements associant l'élimination de l'ammonium et du phosphore à celle de la pollution carbonée.

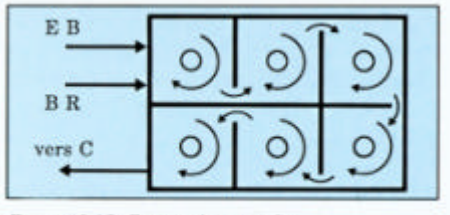


Figure 368. Bassin à cascades.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.5. Bassin à alimentation étagée

(appelé improprement "step aération"). On organise l'arrivée de l'effluent de façon étagée dans le bassin d'aération comportant une série de cellules traversées successivement par la liqueur qui avance en zig-zag. La boue recirculée est introduite en tête du bassin. Les besoins en oxygène sont ainsi beaucoup mieux répartis que dans un bassin à flux piston et, pour une même concentration en MES à l'entrée du clarificateur, la masse de BA présentes dans le réacteur est aussi supérieure.

DEGRÉMONT a mis au point différents systèmes de régulation de cette alimentation étagée (figure 369).

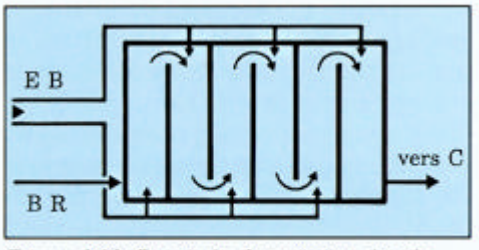


Figure 369. Bassin à alimentation étagée.

1.2.6. Procédé contact- stabilisation

Ce procédé, initialement connu sous le terme de Biosorption (d'INFILCO-DEGRÉMONT), consiste à ne mélanger l'effluent traité avec la boue activée recirculée qu'après une longue période de réaération de celle-ci, période qui permet l'oxydation et l'assimilation de la matière organique stockée (figure 370).

Dans la phase de contact, l'épuration est essentiellement assurée par adsorption, la synthèse de la nouvelle masse bactérienne n'y est que partielle. Elle dure de 20 à 40 minutes sur les ERU.

Les volumes des deux zones sont d'importance comparable.

1.2.7. Procédé adsorption–bioaération

Ce procédé consiste à réaliser l'épuration biologique en deux phases séparées comportant chacune un réacteur et un clarificateur. Elle est mise en oeuvre sur l'effluent brut et comporte

- une phase à très haute charge massique, supérieure à 2 kg $DB0_5$ par kg MES et par jour,
- une phase à moyenne charge (Cm de 0,3 kg DBO_5 par kg MES et par jour).

Ce procédé a pour but de développer deux flores bactériennes entièrement différentes dans les deux étages. Dans le premier, les phénomènes d'adsorption sont prépondérants, un abattement de la $DB0_5$ de l'ordre de 30 à 50 % est recherché. Dans le deuxième, les mécanismes d'oxydation et de synthèse sont prédominants. Une nitrification y est envisageable si la charge massique est adaptée

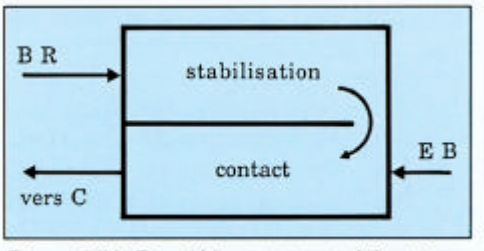


Figure 370. Procédé contact – stabilisation.

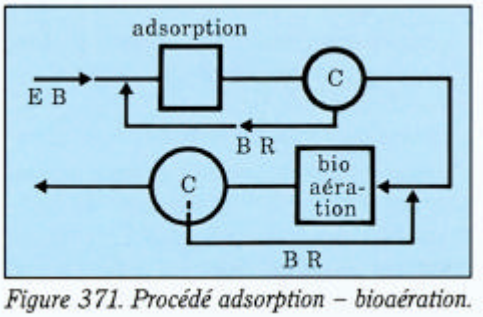


Figure 371. Procédé adsorption – bioaération.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.3. LE CLARIFICATEUR ET LA RECIRCULATION

La séparation du floc bactérien et de la liqueur interstitielle, ou clarification, est normalement assurée par décantation.

Dans un procédé continu d'épuration, ce décanteur, séparé du réacteur proprement dit, est appelé **décanteur secondaire.** Dans des procédés discontinus (à cuvées) ou alternatifs, la décantation peut être assurée dans le réacteur proprement dit. Sur des liqueurs de boues activées à très haute concentration, une séparation par flottation peut parfois être mise en œuvre

Les boues activées sont floconneuses, d'une densité très voisine de celle de l'eau. Leur décantabilité, que l'on contrôle par l'indice de MOHLMAN (voir page 297), dépend d'un certain nombre de facteurs qui influent sur les caractéristiques du floc bactérien: présence de rejets industriels, teneur en oxygène dissous, variation des conditions de charge des micro-organismes tout au long du cycle de traitement, mode d'aération, température, etc. Décantabilité et concentration des boues activées conditionnent, avec le débit d'eau traitée et le débit traversier total (débit traité + débit recyclé), le bon fonctionnement des décanteurs secondaires.

Ceux-ci assurent deux fonctions tout aussi importantes l'une que l'autre

- clarification de l'effluent,
- épaississement de la boue recirculée.

Vitesse ascensionnelle et flux massique de MES sont des paramètres habituels de dimensionnement des décanteurs secondaires, dont les valeurs guides sont les suivantes sur ERU:

Boues	vitesse ascensionnelle		Flux massique (MES)	
	Journalière	Maximale	moyen	maxi.
Moyenne charge	15 - 30	1,2 -1,8	3 - 6	8
	8 -15	0,8 -1,2	2 - 5	6

La vitesse ascensionnelle correspond au seul débit d'eau traitée. Le flux massique est calculé sur le débit traversier total.

Toutefois, les valeurs précédentes doivent parfois être considérablement réduites en cas de mauvaise décantabilité. Le flux volumique (voir page 642) est alors très souvent représentatif de la charge spatiale en boues du décanteur. Dans le cas de gonflement caractérisé des boues avec des indices de MOHLMAN de 300 ou 400 $ml.g^{-1}$ et pour des concentrations de 1 à 2 $g.l^{-1}$, la vitesse ascensionnelle doit être ramenée à quelques dizaines de $cm.h^{-1}$.

D'autres éléments, propres au dessin même des décanteurs, ont leur importance dans les résultats de la clarification: mode de collecte de l'eau épurée, débit linéaire du déversoir de reprise (qui ne devrait normalement pas dépasser 15 $m^3/h.m$).

La profondeur de l'ouvrage est un paramètre capital de dimensionnement. Elle doit être suffisante à la fois, pour disposer du temps nécessaire à l'épaississement de la boue, et pour permettre les fluctuations inévitables du lit des boues dues aux variations des conditions hydrauliques de fonctionnement.

Une hauteur cylindrique minimale de la cuve de 3 m est recommandée pour des ouvrages circulaires de petit diamètre. Elle peut être de 4 à 5 m pour des ouvra-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ges de grand diamètre (40 à 50 m). Les vitesses ascensionnelles maximales admissibles en pratique sont très dépendantes de cette hauteur, lorsque le "volume" des boues est important.

Le **taux de recirculation,** qui détermine la concentration en matières en suspension de la boue recyclée, conditionne le volume occupé et le temps de séjour de la boue dans le clarificateur. S'il est insuffisant, le volume des boues stockées est trop important: le voile de boue s'approche des déversoirs de collecte et la qualité de l'eau se détériore. Il s'ensuit un risque d'anaérobiose et, dans certains cas, de dénitrification, avec remontée en surface des boues activées. S'il est trop important, la clarification peut être perturbée par l'excès d'énergie hydraulique introduite. Pour des boues activées d'ERU de décantabilité correcte, un taux de recyclage réglable entre 50 et 100 % du débit moyen est satisfaisant. Pour des boues très difficilement décantables, un taux de 200 % peut être nécessaire.

L'efficacité d'un décanteur est aussi fonction de sa forme. Les meilleurs résultats sont obtenus par décantation en flux vertical mise en oeuvre dans les ouvrages profonds à fond fortement incliné (50° au moins sur l'horizontale) mais le construction de tels ouvrages, de diamètre limité, est coûteuse. Les appareils de grande surface présentent ainsi des fonds faiblement inclinés et sont souvent équipés de systèmes de raclage par pont ou par chaînes, conduisant les boues dans des fosses d'où elles sont reprises pour le recyclage et l'extraction de la fraction en excès. Toutefois, le raclage mécanique n'est pas le dispositif le plus approprié à des boues souvent légères et floconneuses.

Un système de reprise des boues plus performant est celui des **"décanteurs à succion"** (voir page 652). Il permet :

- un fort débit de recirculation sans créer de vitesses trop élevées de transport des boues sur le fond de l'appareil,

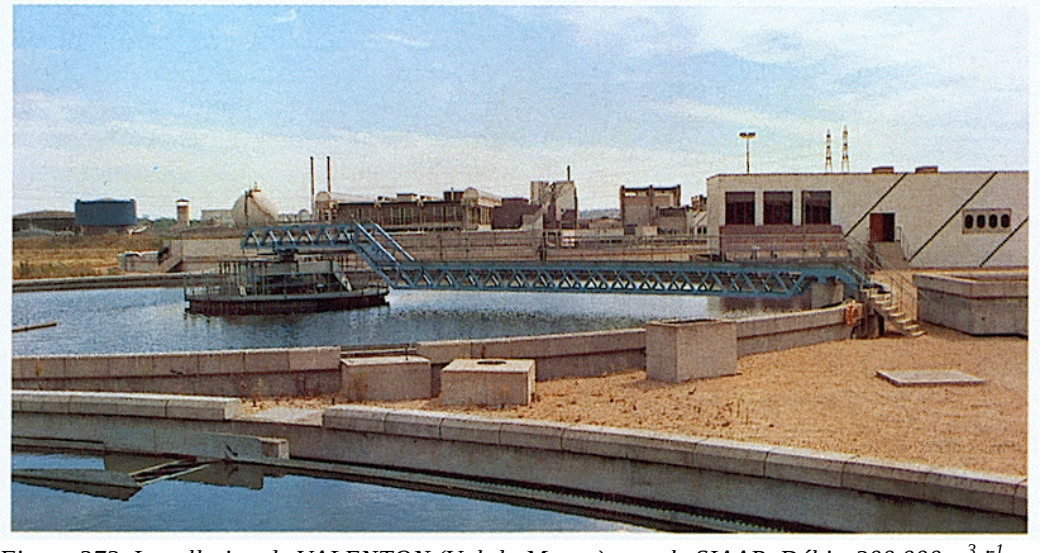


Figure 372. Installation de VALENTON (Val-de-Marne) pour le SIAAP. Débit :300 000 $m^3.j^{-1}$
Epuration biologique par boues activées des ERU de Paris . 4 clarificateurs Æ 52 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- une reprise des boues plus ordonnée, sur **toute** la surface du radier, évitant de trop forts temps de séjour de celles-ci dans le décanteur.

Les risques de dégradation de la boue sont fortement réduits. Cette disposition est indispensable pour des bassins de grande dimension et travaillant dans des conditions difficiles (pays chauds, mauvaise décantabilité des boues). Les tubes de succion sont montés sur un pont mobile (tournant ou se translatant en va-et-vient) ; chacun est associé à un racleur court balayant la surface avoisinante.

DEGRÉMONT a largement développé la technologie de ces décanteurs à succion.

Le dimensionnement d'une installation d'épuration biologique par boues activées porte **à la fois** sur l'ouvrage d'aération, l'ouvrage de clarification, et son système de recirculation. Le dimensionnement de ces éléments est interdépendant. Par exemple, un dimensionnement large du décanteur permettra d'accepter des concentrations de boues activées plus élevées et, par conséquent, des temps de séjour plus réduits dans le réacteur biologique. La figure 373 montre qu'il existe un volume total minimal pour un rendement d'épuration fixé. Ce minimum ne correspond pas nécessairement à l'optimum économique.

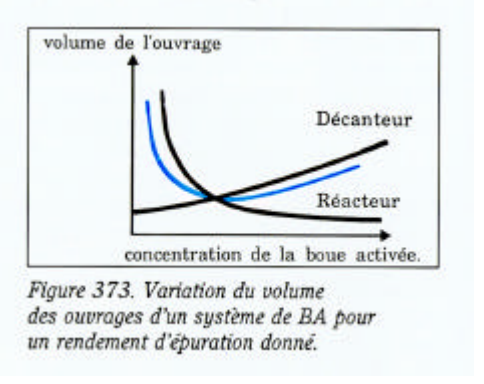


Figure 373. Variation du volume des ouvrages d'un système de BA pour un rendement d'épuration donné.

1.4. SYSTÈMES D'AÉRATION

1.4.1. Critères d'efficacité et comparaison des systèmes d'aération

Les systèmes d'aération équipant un bassin à boues activées ont un double but

- apporter aux micro-organismes aérobies l'oxygène, généralement emprunté à l'air, dont ils ont besoin,
- provoquer une homogénéisation et un brassage suffisants de façon à assurer un contact intime entre le milieu vivant, les éléments polluants et l'eau ainsi oxygénée.

Ces systèmes sont constitués le plus souvent d'un appareil ou d'un ensemble d'appareils placés dans un bassin de volume et de forme déterminés, réalisant simultanément ces deux fonctions.

1.4.1.1. Capacité d'oxygénation en conditions nominales (CAP. OX)

Ce critère de base (CAP. OX) permet de déterminer les possibilités d'oxygénation d'un système d'aération.

Il représente la masse d'oxygène qui peut être transférée par le système, par heure et par m^3 de bassin, à une eau présentant une concentration en O_2 dissous nulle (c'est-à-dire dans les conditions de transfert maximal).

(CAP. OX) = $K_L a.Cs$ (O_2 en kg/h.m^3 de bassin)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- K_La en h^{-1}, est le coefficient global de transfert, et caractérise le transfert d'oxygène de la phase gazeuse (air) à la phase liquide (eau) (voir page 277),
- Cs en $kg.m^{-3}$ est la concentration saturante d'oxygène dans l'eau.

En toute logique, la capacité d'oxygénation du système devrait être établie et contrôlée dans les conditions effectives d'utilisation dans les boues activées; toutefois, les mesures, dans ces conditions, sont très délicates et risquent d'être erronées; c'est pourquoi on préfère généralement évaluer l'efficacité d'un système en eau claire, et dans les conditions nominales, c'est-à-dire

- à la température de 10 °C (20 °C dans certains pays anglo-saxons),
- sous la pression atmosphérique normale de 1013 mbars (soit 10,33 m de CE),
- à une teneur en oxygène dissous constante de 0 $mg.l^{-1}$.

Le passage des valeurs d'essai en eau claire aux valeurs en conditions nominales nécessite l'application de plusieurs correctifs dépendant

- de la température de l'eau,
- de la pression absolue au point de mesure, somme de la pression atmosphérique et de la pression relative moyenne d'eau Hm en ce point (Hm = H X Z).

H est la hauteur d'eau totale. Le coefficient de pression relative Z, qui est une caractéristique du couple aérateur/bassin, peut être apprécié sommairement pour H ≤ 4 m, mais doit faire l'objet d'une détermination plus élaborée pour une hauteur d'eau supérieure. Finalement, la correction globale pour passage en conditions nominales s'écrit :

$$(CAP.\ OX)_n = (CAP.\ OX)_m \cdot T_n$$

avec :

$$T_n = \frac{C_s\ (10\ °C)}{C_s\ (t)} \times \frac{10{,}33 + Hm}{Patm + Hm} \times 1{,}024^{(10-t)}$$

(CAP. OX)n et m = respectivement dans les conditions nominales et dans les conditions de mesure en eau claire.

Tn = coefficient correcteur global.

Cs (10 °C) et (t) =valeurs de la saturation en oxygène à la pression absolue de 10,33 m d'eau, respectivement à 10 °C et à la température d'essai de l'eau.

Patm = pression atmosphérique dans les conditions de mesure, en m d'eau.

t = température de l'eau dans les conditions de mesure en °C.

1.4.1.2. Critères de performance

Connaissant la capacité d'oxygénation nominale, plusieurs critères peuvent être déterminés, aidant au choix et/ou à la comparaison des systèmes d'aération

- **l'apport horaire,** rapporté au bassin entier

AH = (CAP. OX) x V en $kg.h^{-1}$ d'oxygène dissous,

avec V = volume du bassin en m^3,

- **l'apport spécifique,** représentant la quantité d'oxygène transférée par unité de consommation d'énergie :

$$AS = \frac{(CAP.\ OX) \times V}{PA}$$

en kgO^2 dissous/kWh brut ou net, avec PA = puissance de l'aérateur en régime établi en kW (brute électrique aux bornes du moteur, ou nette mécanique à l'arbre du rotor),

- **le rendement d'oxygénation,** qui est le pourcentage de la masse d'oxygène effectivement dissous par rapport à la masse d'oxygène introduit, dans un système à air surpressé. Il peut se calculer en adoptant une masse d'oxygène de 0,3 $kg.Nm^{-3}$ d'air

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

$$R\% = \frac{(CAP.\ OX) \times V \times 100}{0{,}3 \times Q}$$

avec Q = débit d'air insufflé en $Nm^3.h^{-1}$.

Le couple aérateur/bassin est indissociable et toute performance d'un système d'aération doit s'accompagner de la définition complète du couple. On sait en effet par exemple, que les performances d'oxygénation peuvent être accrues dans des conditions exceptionnelles: forte puissance spécifique (par m^3 de bassin) pour des aérateurs de surface, ou faible débit d'air pour des systèmes à fines bulles.

1.4.1.3. Passage des conditions nominales aux conditions effectives

La comparaison des aérateurs en eau claire n'est pas vraiment représentative

des performances qui sont enregistrées dans les conditions effectives réelles d'utilisation en liqueur. En effet, le transfert de l'oxygène peut être grandement influencé par les conditions d'installation, la nature de l'eau résiduaire et la qualité des boues, les conditions de fonctionnement hydraulique et biologique.

Dans les conditions courantes d'utilisation, il est d'usage d'utiliser un coefficient correcteur T à appliquer aux critères définis ci-dessus, pour passer des conditions nominales aux conditions réelles d'utilisation

Conditions effectives

= conditions nominales X T, ce coefficient T étant lui-même le produit de trois coefficients secondaires Tp, Td, Tt.

- **Tp : coefficient d' équivalence eau pure-liqueur,** appelé souvent α dans la littérature anglo-saxonne, dépend de la nature de l'eau et, en particulier, de sa concentration en tensio-actifs, graisses,

matières en suspension, etc., du système d'aération lui-même et de la forme du bassin.

- Td : **coefficient de déficit** en oxygène. L'apport d'oxygène est proportionnel au déficit d'oxygène $C_s - C_x$

C_s: saturation en oxygène dans les conditions effectives: salinité, pression atmosphérique, température, etc.

C_x: teneur en oxygène de la liqueur.

Dans les conditions nominales (à 10 °C), Cs est constant et égal à 11, 2 5 $mg.l^{-1}$, et C_x est nul.

Td est donc égal à $\frac{C_s - C_x}{11{,}25}$

Cs est influencé par

- la salinité de l'eau: le correctif multiplicateur à apporter est égal à

$$\frac{475 - 2{,}65\ S}{475}$$

S étant la salinité en $g.l^{-1}$,

- la température (voir page 509). La concentration de saturation baisse quand la température croît,
- la pression atmosphérique (on ne tient compte en général que des effets de l'altitude).

C_x est le plus souvent pris entre 1 et 2 $mg.l^{-1}$.

- **T_t : coefficient de vitesse de transfert**La température, en s'élevant, augmente la vitesse de transfert gaz-liquide: la correction est égale à $Tt = 1{,}024^{t-10}$ où t est exprimée en °C.

On peut noter que, si les coefficients T_d et T_t sont indépendants du système d'aération, le coefficient d'échange T_p est loin de l'être. De ce fait, les possibilités d'oxygénation des différents dispositifs d'aération ne varient pas de la même façon lorsqu'on passe des conditions nominales aux conditions effectives, et la comparaison, pour être objective, devrait être faite dans ces dernières conditions; elles

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

nécessitent malheureusement la connaissance de T_p dont la définition précise requiert des mesures délicates, effectuées dans une unité pilote d'épuration biologique alimentée avec l'eau résiduaire étudiée.

Le coefficient T_p peut être sensiblement plus faible dans le cas de diffusion d'air en "fines bulles" que dans celui de diffusion en "grosses bulles" ou de l'aération de surface, en particulier du fait de l'influence des détergents tensio-actifs.

La méthode exposée ci-dessus de passage des conditions nominales aux conditions effectives est tout à fait convenable, dans la mesure où les rendements d'oxygénation ne sont pas trop élevés (jusqu'à, par exemple, 25 %) et les hauteurs d'eau sont modérées (jusqu'à 5 m). Mais elle n'est pas applicable pour des systèmes d'aération très performants et pour de grandes immersions, car elle ne tient pas compte de l'appauvrissement progressif en oxygène des bulles d'air, qui peut alors devenir très sensible et entraîner une réduction du coefficient de transfert.

Les performances effectives en liqueur étant généralement inférieures à celles en conditions nominales, l'appauvrissement en oxygène des bulles d'air est plus réduit et, de ce fait, l'effet de diminution du coefficient de transfert provenant de cet appauvrissement est moindre. Ne pas tenir compte de ce paramètre conduit donc à une sous-estimation des performances en conditions effectives en liqueur, d'autant plus marquée que le coefficient T_p habituel du système s'éloigne de 1.

La détermination, avec une suffisante exactitude, des performances réelles d'aération en liqueur, en bassin profond, impose une méthode assez complexe, différentes indéterminations nécessitant des calculs itératifs. DEGRÉMONT utilise un programme informatique adapté, mis au point grâce à la modélisation d'essais d'oxygénation réalisés jusqu'à 25 m d'immersion et atteignant des rendements de l'ordre de 85 %.

1.4.1.4. Autres critères de comparaison

La comparaison porte également sur d'autres critères annexes qui, eux, sont difficilement chiffrables et ne peuvent être estimés que qualitativement

- le brassage, qui doit permettre des vitesses de balayage suffisantes pour éviter les dépôts et assurer une bonne homogénéisation,
- la constance de l'apport spécifique aux différents régimes de marche,
- la fiabilité de tous les organes tels que réducteur, surpresseur, diffuseur, canalisation, etc.

Il ne sert à rien, par exemple, qu'un aérateur présente d'excellentes possibilités d'oxygénation, si c'est au prix d'un brassage hydraulique insuffisant ou de risques de bouchages, dont le résultat serait une baisse de la capacité d'oxygénation et la production de dépôts anaérobies dans le bassin.

1.4.2. Aérateurs de surface

1.4.2.1. Les différents appareils

Les aérateurs de surface se divisent en trois groupes.

Les deux plus importants sont les aérateurs à **vitesse lente**

- **à axe vertical,** qui aspirent l'eau par l'intermédiaire ou non d'une cheminée, puis la projettent latéralement dans l'air,
- **à axe horizontal** (rouleau d'oxygénation ou brosse), qui balaient l'eau par une fraction immergée des pales et la projettent en aval.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le troisième groupe est constitué par les aérateurs à **axe vertical, à grande vitesse,** entraînés directement par un moteur électrique à 750 ou 1500 $t.min^{-1}$ sans réducteur intermédiaire. L'hélice, généralement placée à l'intérieur d'une courte cheminée, est de faible diamètre. L'ensemble mécanique est fréquemment supporté par un ou plusieurs flotteurs, de façon à être simplement posé sur l'eau et offrir une grande mobilité. Ce type d'aérateur a l'avantage d'être bon marché, mais il est gourmand en énergie (l'apport spécifique d'O_2 dépasse rarement 1,4 kg/kWh net) et présente une faible capacité de brassage. Il est mieux adapté au lagunage qu'aux bassins à boues activées, où les dépôts sont à éviter. Ces appareils sont réalisés pour une gamme de puissance 700 comprise entre 2 et 50 kW, sinon plus.

1.4.2.2. Aérateurs à axe vertical et à vitesse lente. Les ACTIROTOR

Ce type d'appareil est aussi ancien que le procédé par boues activées lui-même (Manchester 1916).

Ces aérateurs ont pour avantages

- la simplicité de l'installation et d'utilisation,
- leur rendement énergétique,
- leurs possibilités de brassage.

Ils sont encore très largement utilisés, malgré leur relatif manque de souplesse d'utilisation (en particulier si le nombre d'unités dans le bassin est faible) et certains risques de nuisance (aérosols, bruit). Ces nuisances peuvent être évitées par une couverture judicieuse de la gerbe, complétée par une insonorisation du groupe moto-réducteur.

Le séquençage de fonctionnement par automate (voir page 1143), contrainte souvent nécessaire pour ajuster l'oxygénation aux besoins, peut favoriser une dénitrification partielle.

Les **ACTIROTOR** sont les aérateurs de surface verticaux développés par DEGRÉMONT. Plusieurs milliers sont en service.

a) Le mobile

Le mobile de l'ACTIROTOR (figure 3 74) est du type à roue totalement ouverte, ce qui élimine toute possibilité de bouchage ou empaillassonnage. Il comporte un moyeu creux fermé, sur lequel sont fixées des pales de pompage minces à profil fuyant et des pales de dispersion de la gerbe.

Ce mobile, équilibré, est supporté et entraîné par un arbre tubulaire, bridé sur un groupe moto-réducteur à haut rendement, calculé, suivant les normes AGMA, pour une durée de vie supérieure à 80 000 heures dans des conditions de service intensif.

La vitesse périphérique du mobile, à pleine puissance, varie suivant les types entre 4 et 4,5 $m.s^{-1}$, soit des vitesses de rotation de l'ordre de 100 $t.min^{-1}$ pour les petites unités à 40 $t.min^{-1}$ pour les gros modèles (75 kW). Un fonctionnement à puissance limitée peut être obtenu par moteur bi-vitesse, ou à variation de la vitesse (1).

b) Installation

L'ensemble est fréquemment monté sur support fixe: passerelle, ou, mieux, plate-forme circulaire ceinturée d'une jupe semi-rigide anti-aérosol et anti-bruit, affleurant le niveau liquide (figure 375).

(1) Un autre moyen, parfois utilisé, de réglage de la puissance absorbée, et donc de l'apport d'oxygène, consiste à adapter l'immersion de l'aérateur par des variations du niveau liquide. Cette disposition présente les inconvénients d'une capacité de brassage très réduite à immersion faible et d'à-coups hydrauliques sur le clarificateur si les variations de plan d'eau sont rapides.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

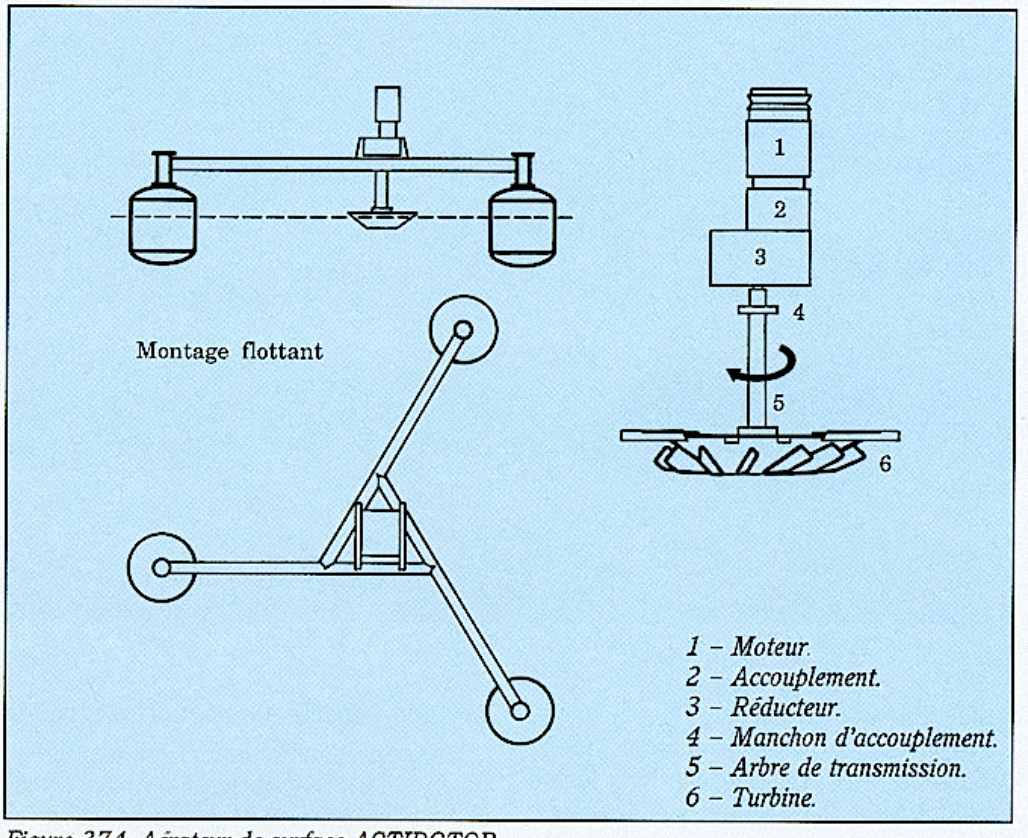


Figure 374. Aérateur de surface ACTIROTOR.

.

Figure 375. ACTIROTOR R 8020 de 75 kW installé sur une passerelle en béton armé

Un montage sur équipage flottant stabilisé (l'écartement des trois flotteurs lestés étant calculé pour ne pas freiner le débit de circulation induit par l'aérateur), avec maintien en position par câbles d'attache ou bras articulé, peut autoriser de grandes variations du niveau liquide, tout en conservant une immersion du mobile sensiblement constante.

Dans le cas d'un bassin à faible charge, une disposition originale - type Manège (figure 376) - autorisant un autodéplacement de l'aérateur sur l'ouvrage, peut assurer un brassage efficace malgré une puissance spécifique globale faible. Cette solution est aussi intéressante en lagunes aérées.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 376. Manège type Actirotor.

c) - Puissance

La puissance absorbée sur l'arbre du mobile de l'ACTIROTOR est de la forme P = K x Np x D5 x Nn, où D est le diamètre du mobile, N le nombre de $t.min^{-1}$, Np un facteur de puissance fonction de la géométrie du mobile et de son immersion. L'exposant n de la vitesse est sensiblement égal à 2,7 dans les conditions normales d'utilisation.

Comme tout aérateur de surface, l'ACTIROTOR prend sa pleine puissance au démarrage; la puissance en régime établi est plus faible, du fait de la mise en rotation de la masse liquide avoisinante, l'abaissement étant d'autant plus sensible :

- que le bassin est plus plat (rapport surface/profondeur élevé),
- que la puissance spécifique est plus grande (les bassins circulaires nécessitent le plus souvent des dispositifs anti-rotatoires).

d) *Apport* spécifique nominal d'oxygène

L'apport spécifique nominal d'oxygène des ACTIROTOR varie, suivant les conditions d'installation et d'utilisation, entre 1,8 et 2,3 kg/kWh net (énergie mécanique mesurée sur l'arbre de l'aérateur).

Pour un ensemble Aérateur/Bassin donné, cet apport peut être influencé par plusieurs facteurs, en particulier

- la puissance spécifique (c'est-à-dire la puissance consommée ramenée au m^3 de bassin) : une puissance spécifique usuelle est de l'ordre de 40 $W.m^{-3}$. Jusqu'à une limite supérieure de l'ordre de 100 $W.m^{-3}$, son augmentation tend à accroître l'apport spécifique,
- le rapport surface/profondeur du bassin: l'apport spécifique optimal est généralement obtenu lorsque le côté du carré (ou le diamètre) est de 2 à 2,5 fois la hauteur d'eau.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

e) Apport spécifique effectif

Pour des eaux usées à prédominance domestique, le coefficient correctif T de passage en conditions effectives est généralement bon, le coefficient Tp eau claireliqueur étant proche de 1.

f) Brassage

L'effet de brassage doit assurer le maintien en suspension des boues et l'homogénéité du mélange, mais également créer des vitesses de balayage du radier (de l'ordre de 0,2 à 0,3 $m.s^{-1}$ suivant la qualité des boues) évitant des dépôts, ce qui est souvent le plus contraignant.

L'effet de brassage est influencé par deux paramètres principaux.

- la puissance spécifique: qui doit atteindre de l'ordre de 30 à 40 $W.m^{-3}$ pour des boues activées d'effluents domestiques; des eaux à prédominance industrielle peuvent nécessiter une puissance plus élevée (selon la viscosité du liquide interstitiel et la nature des MES), à déterminer cas par cas.

- **le rayon de giration** du bassin - par analogie à l'écoulement en canal, on définit le rayon de giration comme le rapport du volume à la surface mouillée. Lorsque le rayon de giration augmente, le brassage s'améliore.

Certains types d'aérateurs doivent être équipés d'une cheminée d'aspiration. Du fait de leur forte capacité de pompage, les ACTIROTOR ne nécessitent pas cet accessoire, sauf cas particulier.

1.4.2.3. Aérateurs à axe horizontal et à vitesse lente. Les ROLLOX

Ces appareils sont similaires aux aérateurs à axe vertical dans leurs fonctions simultanées d'oxygénation par projection aérienne et de brassage par mise en mouvement de la masse liquide. Ils sont destinés à des bassins d'aération en boucle fermée (chenaux) de profondeur modérée, dans lesquels ils induisent un flux horizontal.

Figure 377. Installation de REIMS (Marne). Débit: 5250 $m^3.h^{-1}$. Épuration biologique d'ERU par boues activées. 2 bassins de 3 750 m^3 équipés chacun de 6 ACTIROTOR R 6016 de 37 kW.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

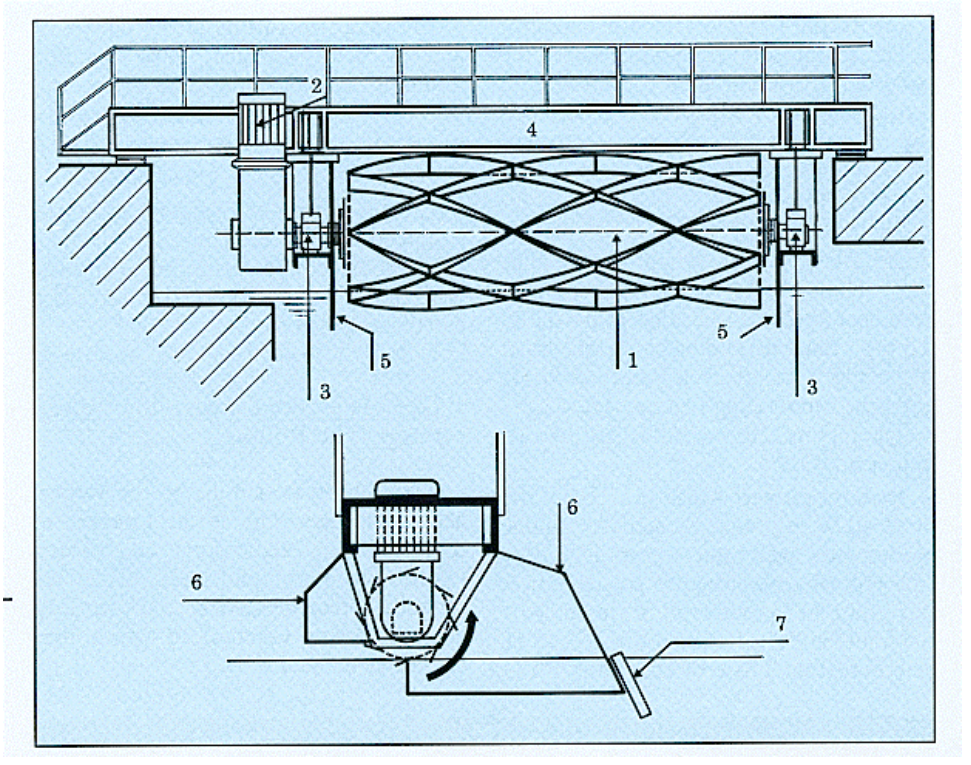


Figure 378. Schéma d'un ROLLOX.

1 - Rotor.
2 - Groupe moto-réducteur.
3 - Paliers.
4 - Chassis-passerelle.
5 - Écran de protection.
6 - Capot.
7 - Déflecteur.

a) Mobile

Le mobile du ROLLOX est constitué d'un cylindre horizontal (diamètre 700 ou 900 mm), sur lequel sont soudées des séries de longues pales minces inclinées en "chevron"; leur disposition assure une surface totale de pales immergée constante en cours de rotation, d'où un fonctionnement équilibré sans variation nuisible du couple moteur (figure 378).

Le rouleau d'oxygénation est supporté par deux paliers d'extrémité largement calculés, comportant une étanchéité soignée, et protégés par carters contre les projections. Cette disposition garantit la longévité des roulements.

Le groupe moto-réducteur d'entraînement à haut rendement est calculé suivant les normes AGMA pour une durée de vie supérieure à 80 000 h dans des conditions de service intensif.

Le ROLLOX est généralement réalisé en ensemble monobloc, l'ossature supportant le rouleau d'oxygénation et constituant passerelle d'accès; des capotages du rouleau en amont et en aval assurent une réduction

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sensible du niveau sonore et des formations cité de pompage élevée, en conditions d'aérosols. A l'aval, un déflecteur incliné immergé favorise l'entraînement de bulles d'air dans la masse liquide.

b) Puissance

Les ROLLOX sont fabriqués en deux gammes

- ROLLOX 700 (puissance nette: 3 kW par m de longueur de rouleau) jusqu'à 18 kW nets,
- ROLLOX 900 (puissance nette: 4 kW par m de longueur de rouleau) jusqu'à 34 kW nets.

c) Apport spécifique d'oxygène

L'apport spécifique nominal varie suivant les conditions d'installation et d'utilisation entre 1,7 et 2,2 kg par kWh net.

Comme pour les aérateurs à axe vertical, le coefficient T_p eau claire-liqueur est voisin de 1 avec un effluent domestique.

d) Brassage

Le principe du mobile assure une capacité de pompage élevée en conditions usuelles d'installation. Sur ERU, une puissance spécifique de l'ordre de 30 $W.m^{-3}$ de chenal permet d'assurer une vitesse de circulation de la boue supérieure à 0,5 $m.s^{-1}$.

1.4.3. Aération par air surpressé

L'aération par air surpressé consiste à insuffler de l'air dans la masse liquide, à des profondeurs variant entre 1 m et éventuellement plus de 10 m. Les dispositifs utilisés se divisent en trois grands groupes, en fonction de la dimension des bulles produites

- grosses bulles (∅ > 6 mm) : cannes verticales, diffuseurs à larges orifices,
- moyennes bulles (∅ 4 à 5 mm): divers diffuseurs permettent de réduire la dimension des bulles libérées: clapets, petits orifices, etc,
- fines bulles: diffusion d'air à travers des corps poreux ou des membranes élastiques finement perforées.

Figure 379. ROLLOX type 740 en service sur un chenal circulaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

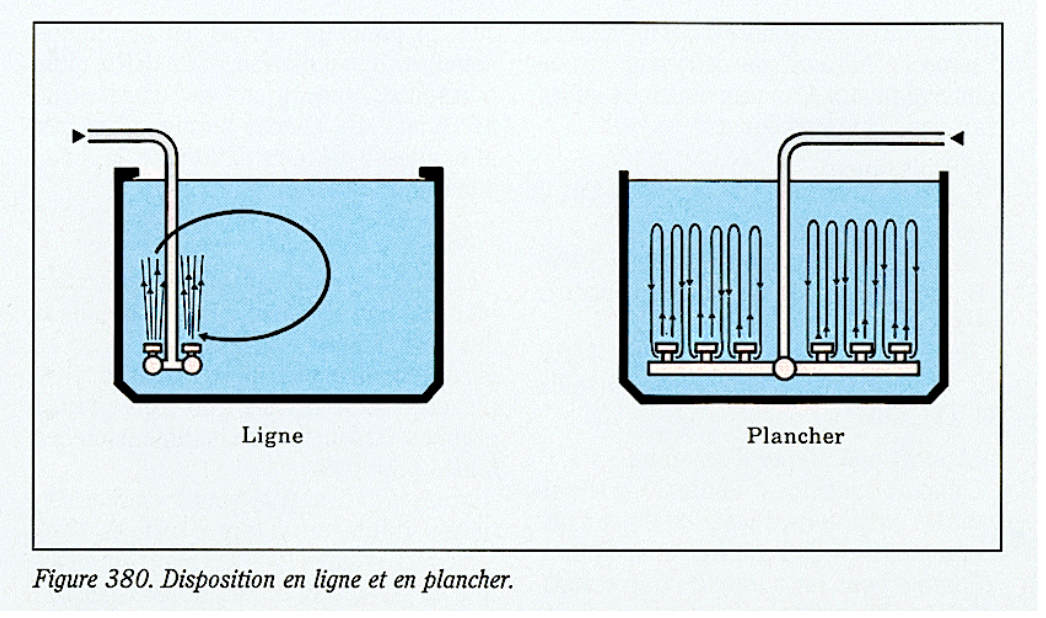


Figure 380. Disposition en ligne et en plancher.

1.4.3.1. Rendement d'oxygénation

Le rendement d'oxygénation nominal en eau claire d'un système donné varie avec la profondeur d'insufflation de l'air (approximativement linéairement entre environ 2,5 et 8 m). Suivant la nature des diffuseurs, les conditions d'installation et d'utilisation, et pour une hauteur d'insufflation de 4 m (et une hauteur d'eau du même ordre), ce rendement nominal varie entre :

- grosses bulles : 4 à 6 %,
- moyennes bulles : 5 à 10 %,
- fines bulles : 15 à 30 %.

Ces différences considérables dans les conditions nominales sont amoindries en conditions réelles, le coefficient correctif T_p eau claire-liqueur étant généralement plus faible pour les fines bulles

- grosses et moyennes bulles: T_p variant entre 1,0 et 0,8 environ,
- fines bulles: T_p variant entre 0,5 et 0,7 environ (ERU).

Néanmoins, le gain énergétique final des fines bulles reste sensible et justifie généralement leur utilisation, malgré un coût d'installation plus élevé.

Le rendement d'oxygénation d'un système donné est influencé par plusieurs facteurs

- la nature des diffuseurs et leur profondeur d'immersion,
- la puissance spécifique émise proportionnellement au débit d'air insufflé: dans les systèmes à grosses et moyennes bulles, l'augmentation du débit se traduit généralement par une tendance à une amélioration du rendement (augmentation de la turbulence); dans les systèmes fines bulles, le rendement a plutôt tendance à diminuer (coalescence plus importante des bulles),
- l'hydraulique induite par la disposition des diffuseurs (voir également brassage). Le rendement d'oxygénation est généralement optimal dans la disposition en plancher, par suite d'une très bonne répartition et d'un temps de séjour maximal des bulles dans la masse,
- la section transversale du bassin.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.4.3.2. Brassage

- **Disposition en ligne:** l'effet d'air-lift créé par la concentration de l'air dans une zone privilégiée induit une giration (ou un spiral-flow) de la masse liquide. Cette disposition crée une vitesse importante de balayage du radier (figure 380).

- **Disposition en plancher:** cette disposition est particulièrement bien adaptée aux bassins profonds (figure 380).

En général, à puissance spécifique égale, le brassage d'un bassin d'aération est plus efficace avec un système à air surpressé qu'avec un aérateur de surface, à condition :

- que le plan de diffusion d'air soit suffisamment proche du radier, en particulier dans la disposition en plancher,
- que le rapport surface liquide/profondeur, dans la disposition en ligne (ou ponctuelle), soit maintenu dans des limites acceptables. Il y a un rapport optimal pour chaque système.

Pour des boues activées traitant des ERU, la puissance de brassage requise est assurée pour des taux d'aération variant entre 4 et 8 $Nm^3.h^{-1}$ d'air par m^2 de surface liquide de bassin.

Figure 381. Bassin d'aération avec disques poreux.

1.4.3.3. Disque poreux DP 230

C'est la référence en matière de fines bulles et l'aboutissement de 50 ans d'expérience dans le domaine des diffuseurs poreux à structure minérale. Le disque (figures 381 et 382) est constitué de grains de corindon artificiel (Alumine α), soudés par un liant céramique vitrifié à haute température; la granulométrie choisie assure un bon compromis entre un rendement d'oxygénation suffisamment élevé et la pérennité de fonctionnement (colmatage progressif) en service continu. Le matériau résiste bien à la plupart des produits chimiques agressifs concentrés.

Les disques, fixés sur des embases en PCV ou en acier inoxydable, sont montés sur des nourrices immergées, groupées en ligne ou réparties sur le fond du bassin.

Les disques, installés généralement dans des bassins de 3 à 8 m de profondeur, assurent un haut rendement d'oxygénation nominal, de l'ordre de 20 à 25 % sous 4 m d'immersion. La perte de charge du diffuseur (poreux + orifice d'équi-répartition) est de l'ordre de 0,03 bar (disque neuf) à 0,06 bar (disque colmaté à régénérer) dans des conditions normales d'utilisation. L'air insufflé doit être au

Figure 382. Disque poreux en service.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

préalable parfaitement filtré (teneur en poussières < 15 mg pour 1000 Nm^3).

Le risque de colmatage par la boue provient essentiellement de la fréquence des arrêts de soufflage, qui sont à éviter. Dans le cas d'utilisation dans une eau spécialement entartrante (carbonate ou sulfate de calcium), un système de dosage séquentiel d'acide dilué (chlorhydrique ou formique) dans l'air insuflé permet d'éviter le risque de colmatage minéral.

Avec ces précautions d'exploitation, les poreux peuvent en général assurer de l'ordre de 10 ans ou plus de service continu; après cette période, les disques peuvent être régénérés par recuisson.

1.4.3.4. Diffuseurs VIBRAIR

Ce sont des diffuseurs d'air en moyennes bulles, particulièrement adaptés à une disposition en ligne.

Le VIBRAIR est constitué d'un corps en polyéthylène moulé, sur lequel vient s'appliquer un clapet vibreur intégré; le clapet comporte une tige traversant l'orifice d'équi-répartition d'air du corps; les déplacements incessants de la tige dans l'orifice empêchent le bouchage de celui-ci. Cette disposition originale autorise un faible débit d'air unitaire et donc un grand nombre de points d'introduction dans la masse liquide, ce qui favorise le rendement d'oxygénation et le brassage.

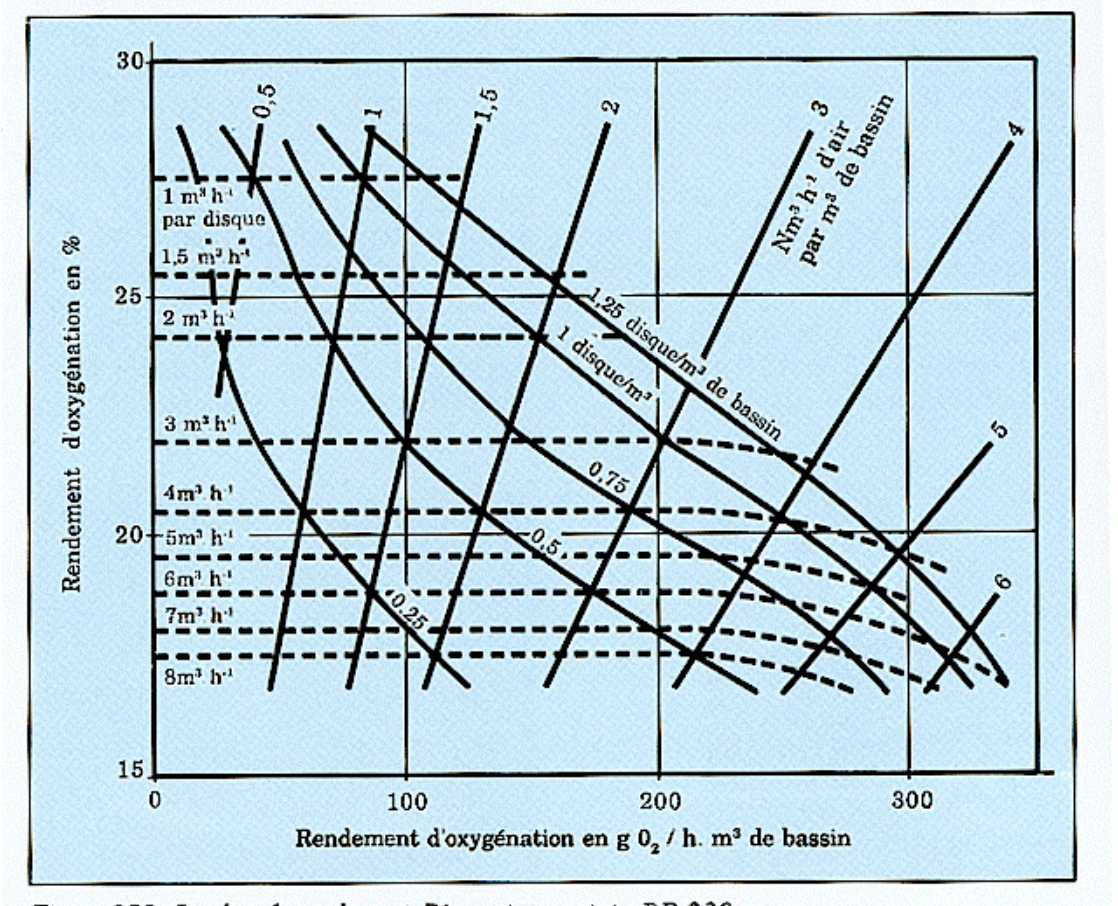


Figure 383. Courbes de rendement. Disque poreux type DP 230.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

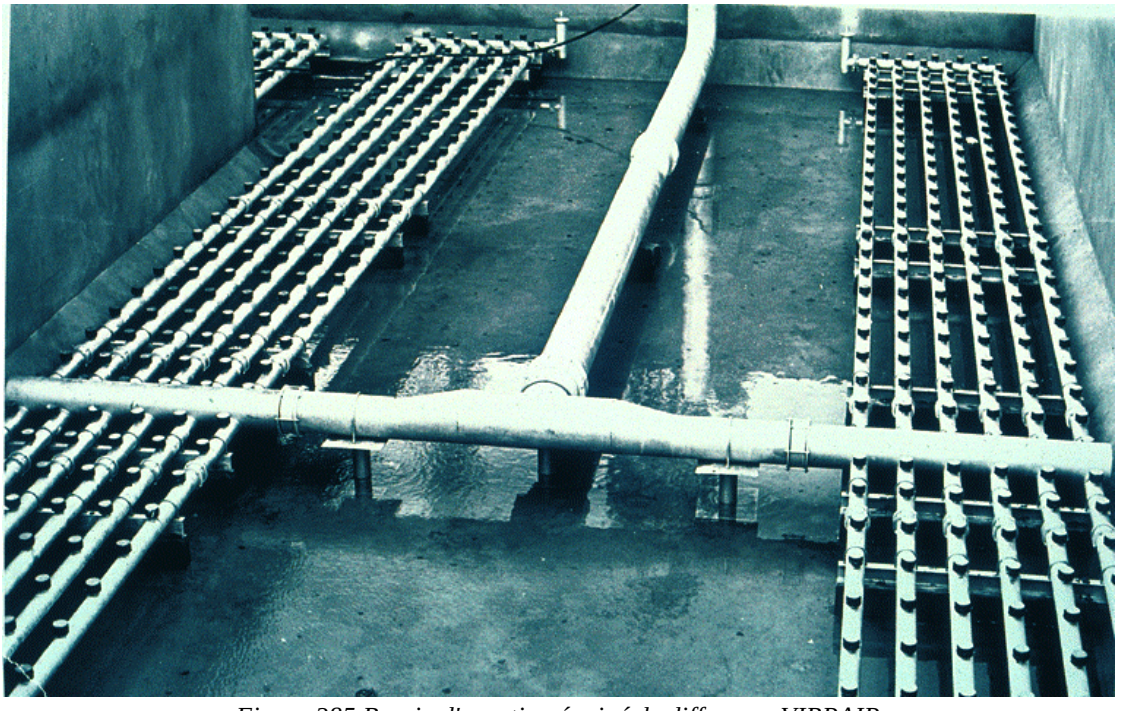
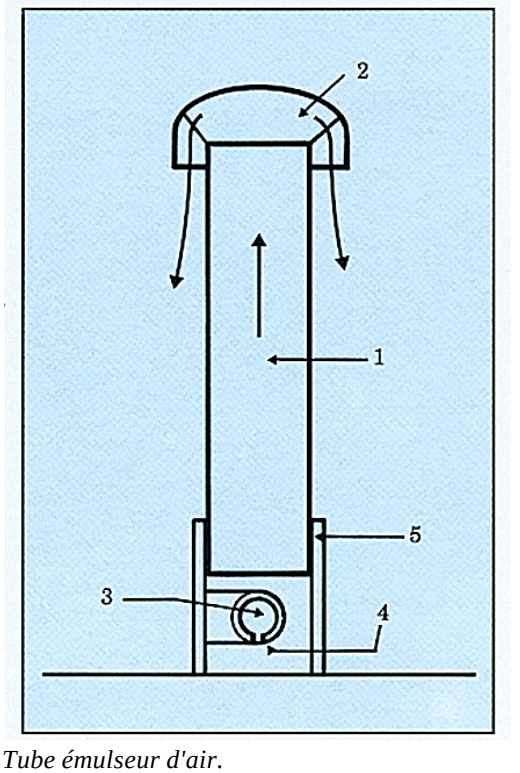


Figure 385.Bassin d'aeration équipé de diffuseurs VIBRAIR

Figure 384. Diffuseurs VIBRAIR.

Deux modèles (figure 384) permettent respectivement des débits unitaires de 1 à 3 $Nm^3.h^{-1}$ et 2 à 10 $Nm^3.h^{-1}$, avec une perte de charge d'équi-répartition de l'ordre de 0,02 bar.

Le rendement d'oxygénation nominal des VIBRAIR est de 8 à 12 % sous 4 m d'immersion. Leur rusticité (filtration d'air grossière) et leur sécurité de marche les rendent particulièrement bien adaptés aux petites et moyennes installations. Ils acceptent un fonctionnement discontinu du système d'alimentation en air.



1 - Tube émulseur d'air.
2 - Cloche d'inversion de flux.
3 - Nourrice d'alimentation
4 - Orifice calibré
5 - Pieds rigides.
Figure 386. Schéma d'un DIPAIR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.4.3.5. Diffuseurs DIPAIR

Les DIPAIR sont des aérateurs statiques immergés, spécialement adaptés à une disposition en plancher, en bassin profond (figure 386).

L'aérateur comporte essentiellement

- un tube émulseur (1), à l'intérieur entièrement libre, situé à l'aplomb d'un orifice de fort diamètre (4) (0 ≅15 mm) ménagé sous la nourrice d'alimentation commune (3),
- une cloche supérieure (2), coiffant le tube et assurant une intense turbulence avec inversion du sens du flux de l'émulsion.

Appareil statique, le DIPAIR ne présente aucun risque d'usure. Construit en polypropylène et acier inoxydable, il présente une grande résistance à la corrosion.

Figure 387. Installation de TARASCON (Bouches-du-Rhône) pour la CELLULOSE DU RHÔNE. Débit: 36 000 $m^3 j^{-1}$ Bassin d'aération profond avec DIPAIR.

- **Débit d'air:** le débit d'air par aérateur est variable entre 30 et 60 $Nm_3.h^{-1}$, avec une perte de charge, à plein débit (dans l'orifice calibré), de 0,03 bar environ.
- **Rendement d'oxygénation:** pour un bassin de 8 m de profondeur, le rendement d'oxygénation nominal en eau claire varie de 22 à 26 % suivant la puissance spécifique dans le bassin. En conditions réelles, le coefficient T_p eau pureliqueur peut être pris égal à 0,9.

.Brassage : le débit pompé par l'aérateur, à son plein débit d'air, est d'environ 150 m^3 h^{-1}. Le débit induit est plusieurs fois supérieur.

1.4.3.6. Diffuseurs à membrane élastique

- **Diffuseur OXAZUR**

Ce sont des diffuseurs d'air en moyennes bulles, particulièrement adaptés à une disposition en plancher, et développés pour les réacteurs à cultures fixées sur lits granulaires (figure 388).

La diffusion de l'air est réalisée par un orifice de 1 mm de diamètre environ. Cet orifice est percé dans une membrane élastique moulée déformable, en élastomère spécial, logée dans un corps en polypropylène.

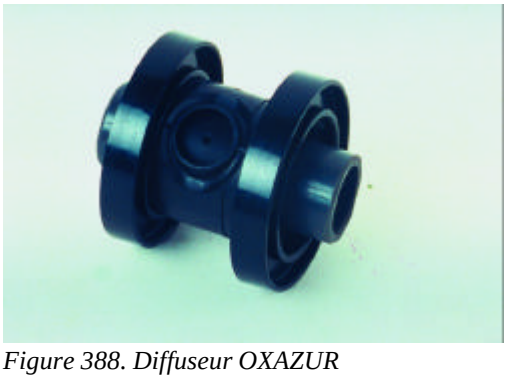


Figure 388. Diffuseur OXAZUR

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le débit d'air par diffuseur est d'environ 1 à 2 $Nm^3.h^{-1}$ pour une perte de charge de l'ordre de 0,05 bar. Le rendement d'oxygénation nominal d'un réseau OXAZUR, favorisé par la très bonne répartition de l'air dans la masse granulaire, est de 10 à 15 % sous 4 m d'immersion.

Figure 389. Diffuseur FLEXAZUR

- **Diffuseur FLEXAZUR**

Dans ce diffuseur, de forme tubulaire (figure 389), la diffusion de l'air en fines bulles est réalisée par une membrane élastique mince déformable, perforée de nombreux orifices ouverts de faible diamètre (de l'ordre de 0,2 mm).

Le mode de perforation, original, permet d'obtenir un bon rendement d'oxygénation et une perte de charge réduite.

Le rendement d'oxygénation nominal du FLEXAZUR est de 25 à 30 % sous 4 m d'immersion, avec une perte de charge (diffusion + répartition) comprise entre 0,03 et 0,05 bar.

1.4.4. Aération mixte - Fonctions aération/brassage séparées

La séparation des deux fonctions offre la possibilité de maintenir un brassage efficace malgré un débit d'air éventuelle
ment faible ou nul

- la fourniture d'air peut être limitée aux seuls besoins de l'oxygénation,

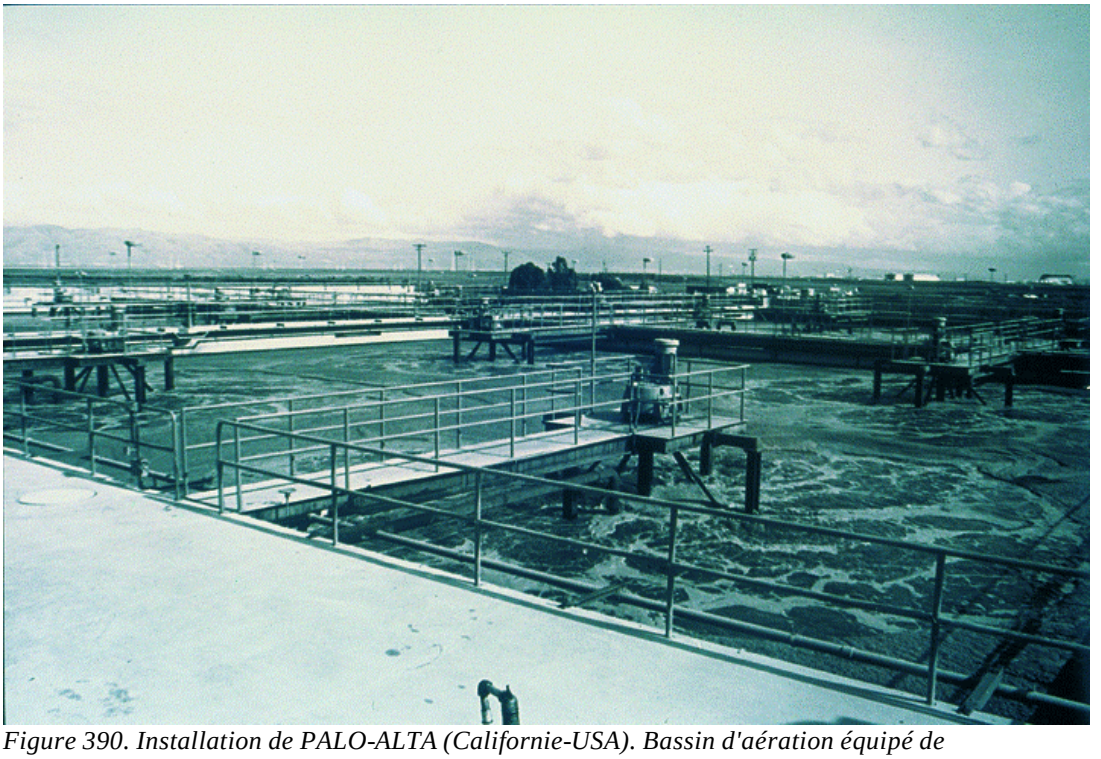


Figure 390. Installation de PALO-ALTA (Californie-USA). Bassin d'aération équipé de VORTIMIX, pour le traitement d' ERU

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- des arrêts séquentiels de l'aération peuvent assurer des périodes d'anoxie (pour dénitrification) en conservant l'homogénéité du mélange.

La possibilité d'un rendement hydraulique élevé du mobile de brassage autorise un bon rendement énergétique global.

1.4.4.1. Aérateur à flux vertical VORTIMIX

Il comporte :

- un agitateur mécanique à axe vertical, avec turbine immergée à vitesse lente (constante ou réglable) créant un flux descendant,
- un dispositif d'insufflation d'air surpressé sous l'hélice.

La consommation globale d'énergie est du même ordre que celle d'un aérateur de surface à vitesse lente; elle peut devenir inférieure lorsque les problèmes de brassage sont prépondérants.

Ce type d'équipement convient en particulier aux régions à basse température et/ou lorsqu'on désire éviter les aérosols.

.Puissance agitateur: gamme de 10 à 100 kW nets.

- **Air et rendement d'oxygénation**

- Volume d'air dispersé: 30 Nm^3 par kWh net à la turbine soit une gamme de débits d'air de 300 à 3 000 $Nm^3.h^{-1}$, à une pression comprise entre 0,25 et 0,5 bar suivant la profondeur d'insufflation.
- Rendement d'oxygénation nominal en eau claire variant entre 3 0 % à pleine charge et 45 % à faible débit d'air, pour une immersion du diffuseur d'air de 3 m et une profondeur liquide de 5 m.

- **Brassage**

En traitement d'ERU, le brassage nécessite une puissance spécifique (développée par la turbine) entre 15 à 30 $W.m^{-3}$ avec air insufflé et 5 à 10 $W.m^{-3}$ sans air.

1.4.4.2. Insufflation d'air et circulateur à flux horizontal

Il est possible d'associer dans un chenal à boucle fermée, un (ou plusieurs) circulateurs à flux horizontal à hélice lente et des diffuseurs d'air (voir page 720).

Un circulateur à haut rendement hydraulique peut assurer une vitesse de circulation suffisante avec une puissance spécifique de l'ordre de 2 à 5 $W.m^{-3}$ de bassin.

La bonne dispersion des bulles, favorisée par le flux liquide horizontal, peut assurer un bon rendement énergétique global, souvent meilleur que celui obtenu avec les seuls diffuseurs.

1.4.4.3. Mélangeurs - Aérateurs

Ces appareils, généralement immergés dans le bassin, comportent un mobile hydraulique de pompage (à vitesse rapide avec entraînement direct par moteur électrique) aspirant directement de l'air atmosphérique et le libérant en fines bulles dans le flux pompé.

L'attrait de leur simplicité ne doit pas faire oublier leur rendement énergétique, le plus souvent faible: l'apport spécifique nominal d'oxygène est fréquemment inférieur à 1 kg par kWh, du fait d'une capacité d'aspiration d'air limitée.

1.4.5. Emploi de l'oxygène pur

1.4.5.1. Domaines d'emploi

L'oxygène pur, en réacteur fermé, peut être employé dans plusieurs cas

- **Stations de boues activées à fonctionnement continu sous oxygène**

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- Stations d'épuration biologique couvertes placées en environnement sensible (désodorisation nécessaire),
- Traitement d'ERI concentrées à pollution essentiellement biodégradable.

.Stations de boues activées à charge variable

Par exemple, station en zone touristique présentant en "haute saison" des besoins en oxygène très supérieurs à la moyenne de l'année (bassin en aération traditionnelle avec "dopage" saisonnier en O_2 pur).

- **Préoxygénation forcée d'eaux usées ou de liqueurs**

- A des fins de prévention d'odeurs (cas de l'injection dans les réseaux sous pression),
- Ou à des fins d'enrichissement en oxygène avant traitement de filtration biologique en enceinte fermée sous pression (voir page 739).

1.4.5.2. Avantages

- Par suite de la pression partielle d'oxygène très élevée, on dispose de capacités d'oxygénation plusieurs fois supérieures à celles disponibles avec le seul air atmosphérique. D'où la possibilité de pouvoir satisfaire les besoins de boues activées plus concentrées soumises à des charges volumiques plus importantes. Une certaine réduction du volume des réacteurs biologiques est ainsi possible,
- Du fait du faible volume de gaz utilisé pour l'oxygénation, le dimensionnement d'une installation de désodorisation éventuelle de réacteurs fermés est considérablement réduit.

1.4.5.3. Mise en oeuvre

- **Réacteurs à boues activées**

La mise en oeuvre la plus courante d'un gaz enrichi en oxygène est celle des bassins fermés dans lesquels le "ciel gazeux" est maintenu à une pression partielle d'oxygène élevée.

Toutefois, l'épuration d'effluents très chargés, au moyen d'oxygène pur et en bassins fermés, présente l'inconvénient de freiner l'évacuation du CO_2 libre produit par la respiration bactérienne. Pour

Figure 391. Installation de LEYKAM (Autriche). Traitement des effluents de papeterie. Débit: 856 $m^3.h^{-1}$. Réacteur biologique de BA à l'oxygène pur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

limiter la production de ce gaz, on accroît l'alcalinité de la liqueur ou on pratique un strippage à l'atmosphère. C'est pourquoi l'adoption du système DEGRÉMONT à deux étages (oxygène suivi d'air) est souvent intéressante. L'utilisation d'oxygène pur dans les premières cellules du réacteur permet de limiter les dépenses d'énergie et les volumes d'ouvrage, pour l'élimination de la majeure partie de la pollution. L'emploi de l'air dans les dernières cellules permet, lui, d'éliminer du CO_2 libre et de réduire les phénomènes de dégazage et de moussage dans le clarificateur. Il participe à l'élimination de la pollution résiduelle et assure éventuellement la nitrification.

De façon à limiter le plus possible les pertes, le réacteur à l'O_2 comporte, en général, plusieurs cellules traversées successivement par le mélange gazeux. Le taux d'utilisation d'oxygène dans le réacteur est voisin de 90 %.

L'entrée de l'oxygène pur est normalement asservie à la pression dans l'atmosphère du réacteur. Par sécurité, celui-ci est équipé d'un détecteur d'hydrocarbures dans le ciel gazeux.

- **Séparateur**

La séparation de la boue activée est, en général, effectuée dans un décanteur, le soutirage de la boue à forte concentration autorisant normalement un taux de recyclage plus faible qu'en aération classique.

Dans certains cas, si une fuite de MES non négligeable est acceptable dans l'eau traitée (par exemple, prétraitement d'un effluent fortement concentré avant rejet en station municipale), une séparation par flottation à air dissous permet d'atteindre directement une concentration optimale des boues dans le réacteur.

- **Dispositifs d'oxygénation et brassage**

Les aérateurs de surface sont du type à vitesse lente, en acier inoxydable, avec groupe d'entraînement à l'air libre et joint hydraulique d'étanchéité.

Dans le cas de variations sensibles de la charge, des systèmes, séparant les fonctions oxygénation et brassage et permettant d'assurer ce dernier avec une consommation d'énergie très réduite, peuvent se révéler bien adaptés.

Pour des petites unités, l'utilisation de bassins ouverts et de systèmes déprimogènes, (dans lesquels le gaz est introduit à basse pression au col d'un éjecteur à travers lequel on recircule le contenu du bassin), permet de réduire notablement les investissements.

1.4.5.4. Production de l'oxygène

Le cas le plus favorable est, de loin, celui où l'oxygène pur est disponible dans un oxyduc passant à proximité et provenant d'une aciérie ou d'une grande unité de production autonome.

Si ce n'est pas le cas, dans les petites stations, l'oxygène est fourni sous forme d'oxygène liquide, stocké dans des conteneurs soigneusement isolés et munis d'évaporateurs.

Pour les grandes stations plus importantes, deux technologies sont possibles
celles des tamis moléculaires (PSA = Pressure Swing Adsorber) jusqu'à des capacités de 30 $t.j^{-1}$, ou celle des postes cryogéniques à partir de 10/20 $t.j^{-1}$. Généralement, le gaz produit présente une pureté comprise entre 95 et 99 % d'O_2

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.5. UNITÉS COMPACTES

1.5.1. Généralités

La disposition la plus habituelle des stations d'épuration par boues activées est celle à ouvrages séparés. Les bassins d'aération sont reliés aux clarificateurs par canaux ou conduits avec interposition éventuelle d'ouvrages de désaération ; les organes de recyclage des boues sont situés à l'extérieur des clarificateurs ou intégrés à ceux-ci. Ce mode de réalisation permet des possibilités d'implantation très variées et présente une grande souplesse d'adaptation aux habitudes de construction locales ainsi qu'aux contraintes liées à la nature du terrain ou à la nappe souterraine. En contrepartie, il conduit à une emprise au sol plus importante que celle des unités compactes.

Ces unités **compactes** d'épuration par boues activées sont **standardisées.** Elles permettent de traiter des ERU dans une gamme de quelques centaines à 20 000 usagers environ, en aération prolongée, et au-delà en moyenne charge.

Elles réunissent, dans une même structure, les phases d'aération et de décantation. Elles assurent une simplification des circuits hydrauliques et une commodité d'accès. L'esthétique des ouvrages est améliorée et leur couverture plus aisée.

Le prétraitement de l'eau brute comporte un dégrillage mécanique, un dessablage et un dégraissage, avec stockage automatique des résidus (séparés ou rassemblés, selon leur mode d'évacuation) en vue d'un enlèvement hebdomadaire. Suivant les cas, l'ouvrage de prétraitement peut être intégré à l'unité d'épuration biologique (facilité d'accès) ou placé en amont (par exemple sous la forme d'un ensemble métallique préfabriqué pour les petites stations).

Les unités compactes DEGRÉMONT, classées par capacité croissante, sont les Suivantes :

MINIBLOC AP	100 à 500 hab. (variante avec enveloppe béton jusqu'à 2 500 usagers).
COMPACT MA	1000 à 10 000 hab.(réalisation avec aération mécanique ou insufflation d'air).
COMPACT ALTERNÉ	1000 à 10 000 hab.
COMPACT CHENAL	1000 à 20 000 hab.
OXYRAPID R	20 000 et au-delà

1.5.2. Stations à aération prolongée

Elles sont conçues en vue d'un fonctionnement autonome, sans personnel permanent, suivant les critères suivants

- procédé simple (sans décantation primaire) avec bassin d'aération en mélange intégral, mais sécuritaire, au prix d'un large dimensionnement des ouvrages,
- exploitation peu coûteuse en main-d'oeuvre, avec une dépense énergétique raisonnable.

Elles peuvent être équipées d'un automate programmable qui assure

- la gestion de l'oxygénation des boues activées, par séquençage chronologique en fonction de la courbe de charge de la station ou/et des tranches de tarif horaire du fournisseur de courant électrique, avec maintien d'un brassage minimal,
- la gestion du recyclage et de l'extraction des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

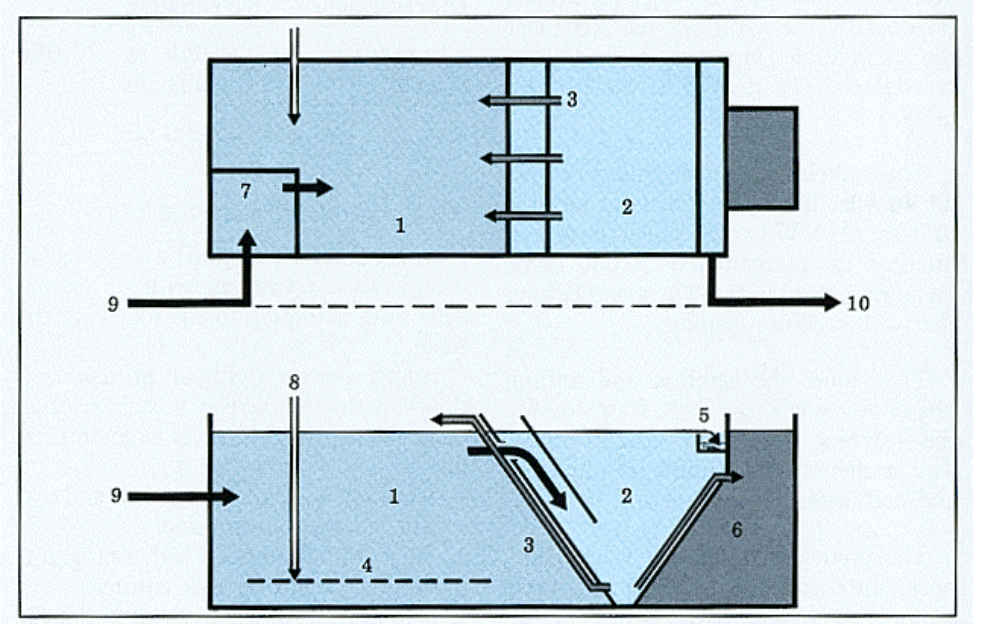
Le réacteur biologique permet une stabilisation simultanée de la boue. L'installation d'une grille d'épaississement GDE sur silo de stockage est un moyen simple (nécessitant néanmoins l'utilisation de polymère) pour obtenir une boue liquide épaissie (6 à 8 % de MES) et réduire ainsi sensiblement les volumes à évacuer. Éventuellement, le silo peut être aéré et brassé pour assurer un effet de stabilisation complémentaire par digestion aérobie.

1.5.2.1. MINIBLOC AP

Le MINIBLOC (figure 392) réunit, dans une cuve métallique unique, de forme parallélépipédique, fabriquée en atelier, les divers compartiments nécessaires au processus du traitement - aération (1), clarification (2), recyclage des boues (3), éventuellement relèvement de l'eau brute ou de l'eau traitée.

L'aération est assurée par insufflation d'air surpressé (4), (diffuseurs VIBRAIR, OXAZUR ou FLEXAZUR). L'air est fourni par un surpresseur placé sur l'appareil, sous capot insonorisé; le surpresseur alimente également une batterie d'émulseurs à air (3) fonctionnant en parallèle, de façon séquencée alternée, et assurant le recyclage des boues décantées vers le compartiment d'aération.

Éventuellement, le déversoir (5) de reprise de l'eau traitée est protégé par une cloison siphoïde retenant les matières flottantes, reprises périodiquement par un émulseur.



1 - Aération prolongée.
2 - Clarification
3 - Recyclage de boues
4 - Diseurs d'air.
5 - Déversoir.
6 - Stockage de boue.
7 - Dégrillage manuel et dégrillage grossier
8 - Arrivée d'air de procédé.
9 - Entrée d'eau brute.
10 - Sortie d'eau traitée.

Figure 392. Schéma d'un MINIBLOC AP (100 à 500 usagers).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 393. Installation de DAMPIERRE-EN-BURLY (Loiret). Capacité: 400 éq. hab. MINIBLOC AP.

Le MINIBLOC est préfabriqué en 5 modèles de 100 à 500 usagers.

Un platelage bois, semi-étanche, évite tout risque d'accident et autorise l'implantation de l'appareil en zone urbaine (niveau sonore très faible, inférieur à 45 dB sur demande).

1.5.2.2. Compact MA

Le MA comporte un ouvrage en génie civil monobloc, d'accès aisé, sans conduite sous radier, et équipé d'un pont-racleur à va-et-vient. Il peut être réalisé avec aération de surface ou insufflation d'air (figure 394).

a) Unité avec aération de surface

L'unité est constituée d'un bassin d'aération des boues activées, carré ou rectangulaire, et d'un clarificateur accolé, de forme demi-circulaire et à fond sensiblement plat, avec passerelle commune d'accès.

Bassin d'aération (1) : le brassage et l'aération sont effectués par un ou plusieurs aérateurs(s) de surface ACTIROTOR (3), placé(s) sur une plate-forme circulaire montée sur poteaux et accessible depuis la passerelle; une jupe semi-rigide, éventuelle, masque le bruit de la gerbe et évite la pollution atmosphérique (suppression des aérosols). La capacité d'oxygénation de l'aérateur autorise normalement des périodes d'arrêt assurant des phases d'anoxie propices à une dénitrification partielle dans le bassin d'aération.

Clarificateur (2) : l'introduction de la liqueur en provenance du bassin d'aération s'effectue au centre du demi-cercle, par une pipe à inversion de flux (8) dans une zone d'entrée délimitée par une cloison siphoïde immergée (4) ; cette zone d'entrée, de grande capacité, assure la dissipation de l'énergie du flux introduit et le dégazage de la liqueur avant décantation.

Les boues décantées en fond d'ouvrage sont raclées par un pont tournant (5), à fonctionnement demi-circulaire alternatif, équipé d'un (ou deux) tube(s) suceur(s) à émulseur d'air (6) capables d'un fort débit (de l'ordre de 150 % du débit moyen à traiter); les boues reprises

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

par l'émulseur sont recyclées gravitairement au bassin d'aération. L'air surpressé, nécessaire à l'émulseur de recyclage, est fourni par un ventilateur centrifuge placé sur la passerelle fixe.

L'eau clarifiée est reprise par déversement dans une rigole périphérique (7), ou par une tuyauterie à orifices noyés. Les écumes et matières flottantes en surface sont éventuellement retenues: une lame racleuse articulée, portée par le pont alternatif, les dirige alors vers une boite de collecte latérale, à reprise automatique, pour être stockées dans une bâche vidangeable.

Une variante de réalisation prévoit un décanteur rectangulaire équipé d'un système de reprise des boues similaire (figure 395).

b) Unité avec insufflation d'air

Cette unité est un ouvrage de forme entièrement circulaire avec fond plat ou tronconique à faible pente. Des parois internes radiales verticales délimitent des secteurs constituant un bassin d'aération des boues activées, un clarificateur, éventuellement un compartiment regroupant les prétraitements et la fosse de stockage des boues (figure 396).

Bassin d'aération (1) : le brassage et l'aération sont effectués par insufflation d'air

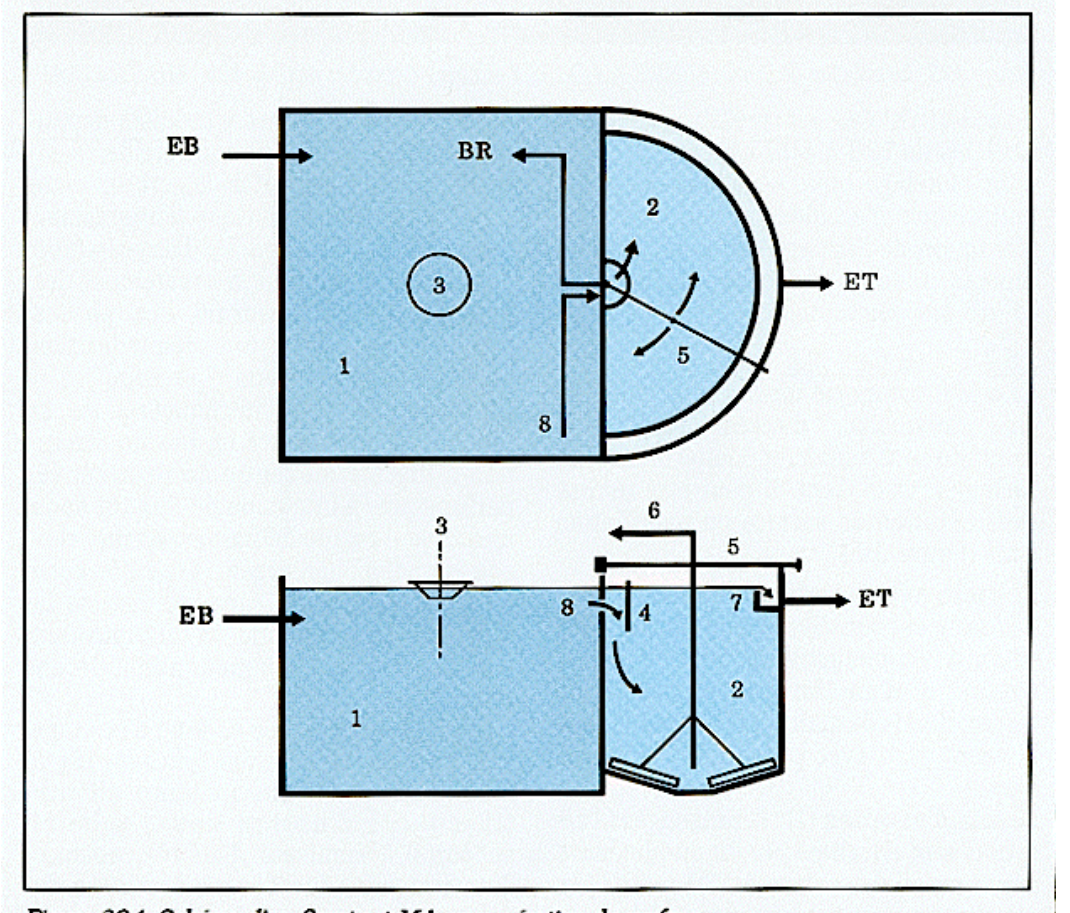


Figure 394. Schéma d'un Compact MA avec aération de surface.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

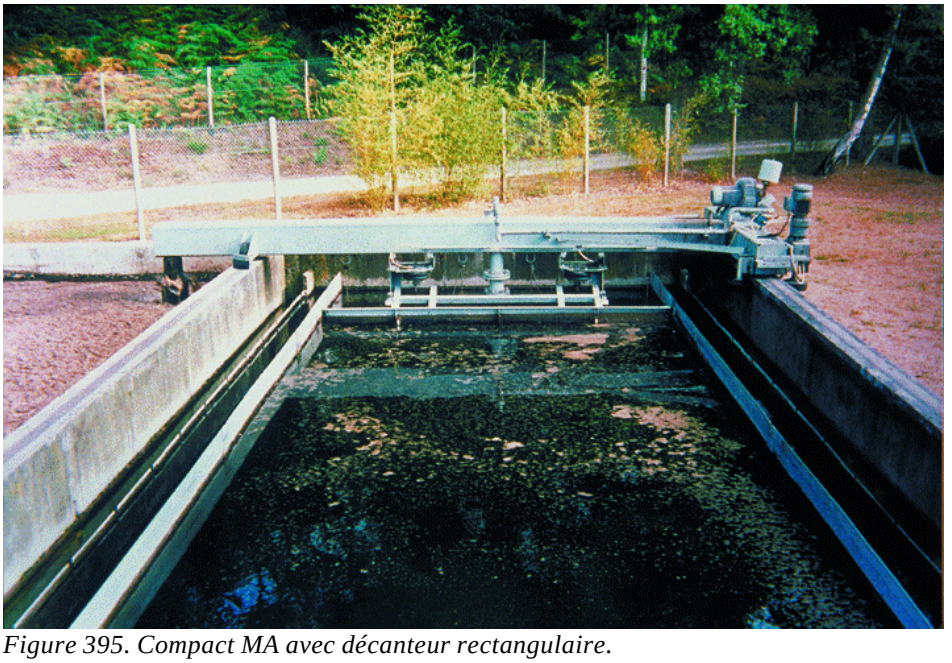


Figure 395. Compact MA avec décanteur rectangulaire.

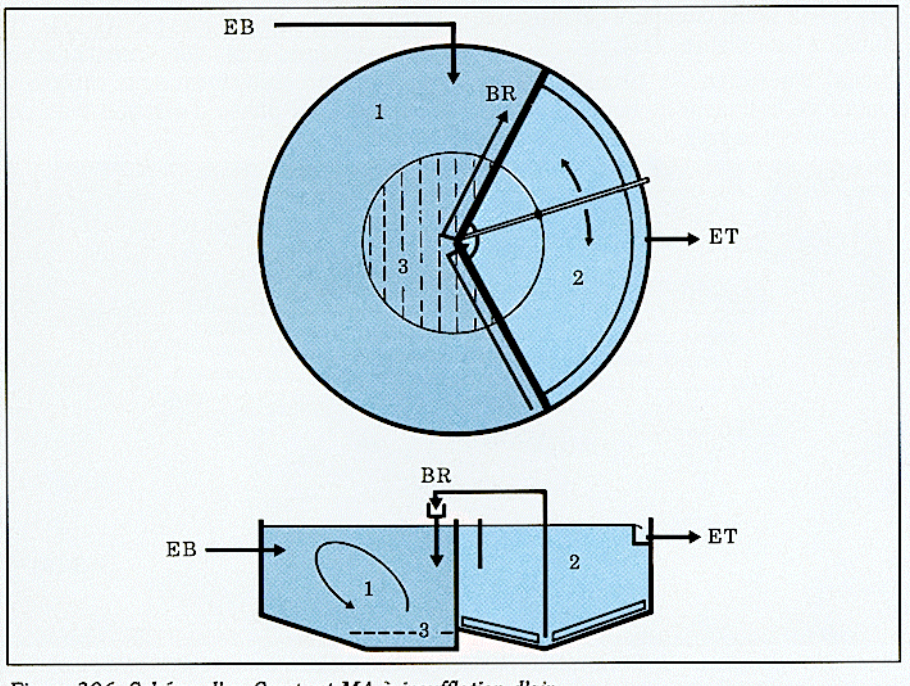


Figure 396. Schéma d'un Compact MA à insufflation d'air.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

au moyen de diffuseurs (3) à moyennes bulles (VIBRAIR, OXAZUR) ou fines bulles (poreux ou FLEXAZUR). L'air insufflé est fourni par un (ou des) surpresseur(s) placé(s) dans un local séparé ou éventuellement en extérieur sous capot insonorisé.

Clarificateur (2) : il est de conception similaire à celui du modèle précédent, à la seule différence d'un angle d'ouverture adaptable du secteur.

Remarque: il est à noter que sur ces unités Compact MA, différenciées morphologiquement dans certains cas (liés au terrain ou à l'environnement), l'insufflation d'air peut être remplacée par une aération mécanique et vice versa.

1.5.2.3. Compact Chenal

C'est un ouvrage en génie civil monobloc circulaire, constitué d'un chenal d'aération annulaire extérieur, à fond plat, et d'un clarificateur circulaire central raclé à faible pente (figure 397).

Chenal daération: la circulation horizontale de la liqueur de boue, l'homogénéisation et l'oxygénation sont assurées par un ou plusieur aérateurs mécaniques horizontaux, du type ROLLOX ou similaire.

Clarificateur : il est raclé, avec reprise des boues au centre, et recyclage par pompe immergée et puits séparé. L'alimentation en liqueur s'effectue dans un déflecteur circulaire central; la reprise de l'eau épurée par une rigole périphérique.

Variante: si on désire séparer les fonctions de circulation et d'oxygénation, les aérateurs mécaniques peuvent être remplacés par :

- un ou plusieurs circulateurs immergés avec hélice de grand diamètre (1),
- un ensemble d'insufflation d'air, avec diffuseurs moyennes ou fines bulles (2) (figure 398).

1.5.2.4. Compact Alterné (ou ALTER 3)

Les systèmes à fonctionnement alterné utilisent successivement deux capacités identiques en phase d'aération puis de décantation.

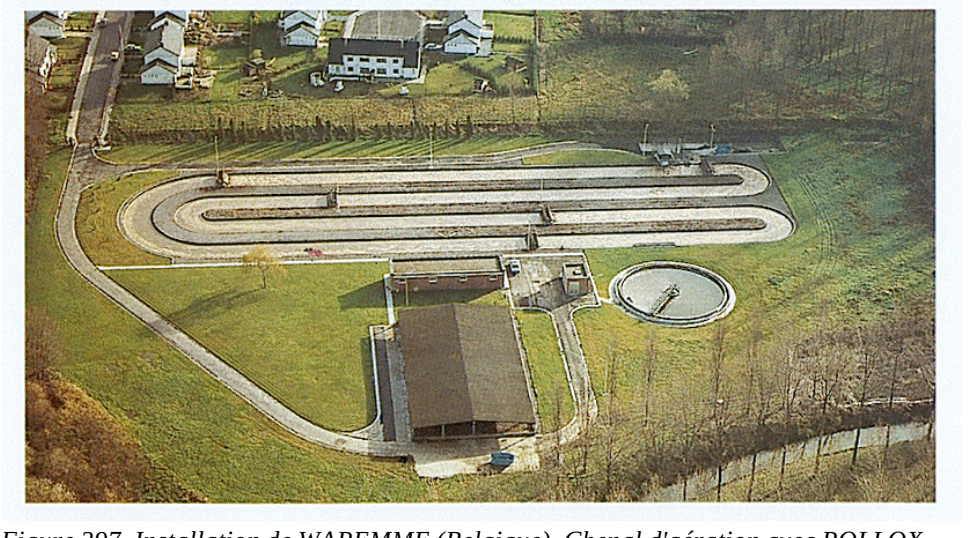


Figure 397. Installation de WAREMME (Belgique). Chenal d'aération avec ROLLOX pour le traitement d ERU.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

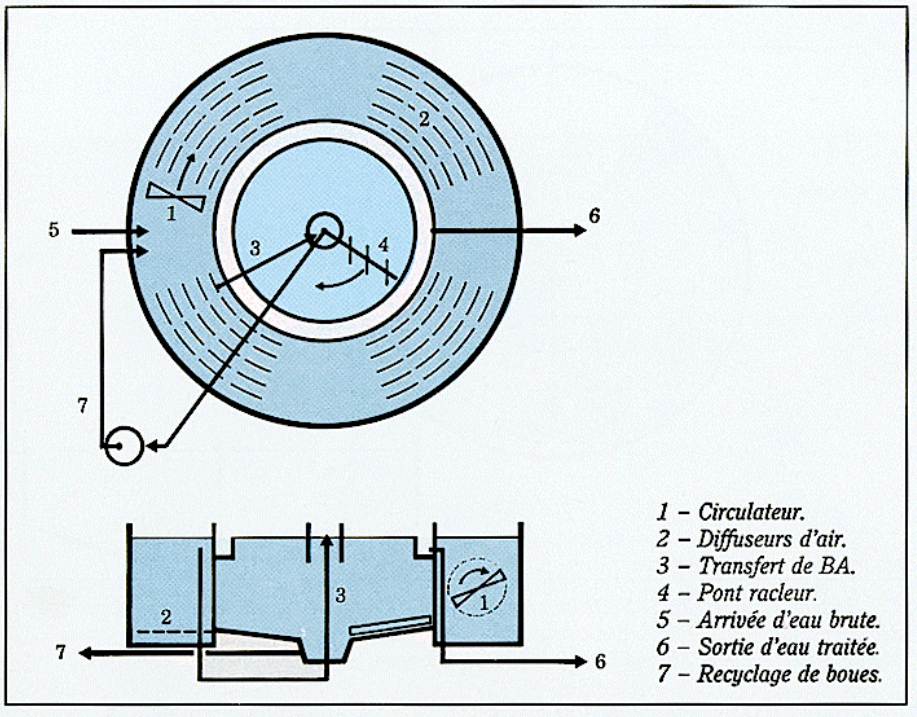


Figure 398. Compact Chenal. Variante avec circulateurs et insufflation d'air.

Ils évitent tout équipement mobile immergé (en particulier le pont racleur). Le taux de dénitrification est relativement élevé. DEGRÉMONT a une longue expérience de ces systèmes alternés.

L'ouvrage comporte (voir figure 399)

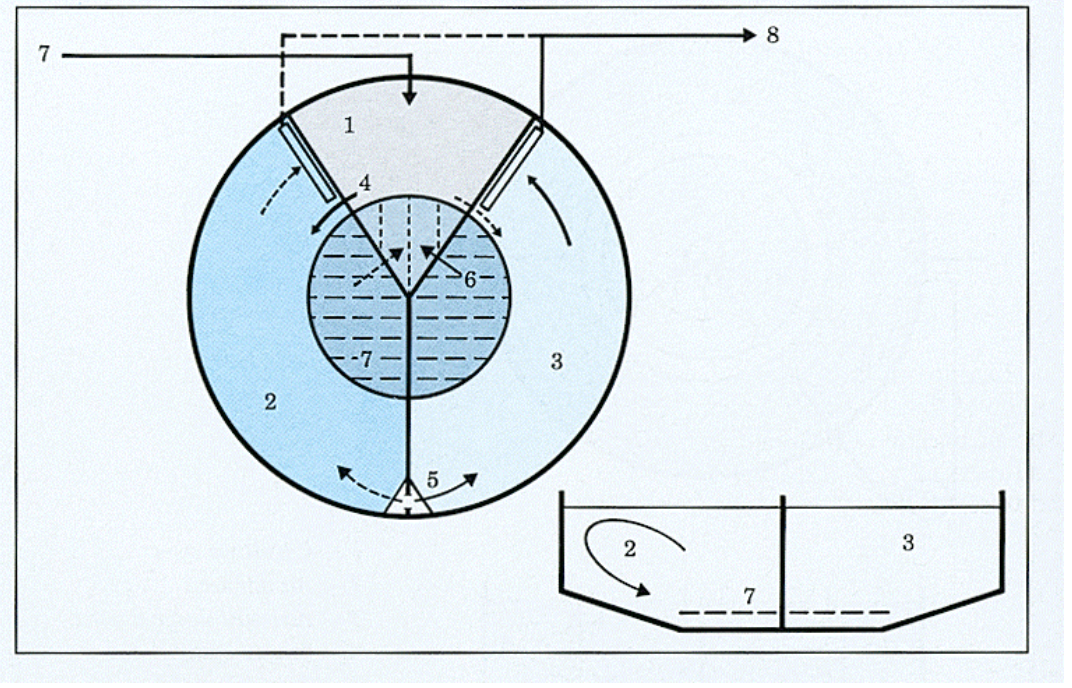
- un secteur d'entrée (1), constituant un bassin à boues activées à aération permanente,
- deux secteurs (2 et 3) à fonctionnement alterné aération/clarification, avec cycle réglable.

Le fonctionnement sur un cycle est le suivant :

- l'eau brute prétraitée est introduite au secteur (1), aéré et brassé en permanence,
- un transfert permanent (4) de liqueur s'établit gravitairement du secteur (1) au secteur (2), brassé et aéré, éventuellement par séquences,
- un second transfert de liqueur (5), de débit équivalent, s'établit gravitairement du secteur (2) au secteur (3), non brassé et non aéré, dans lequel s'effectue la clarification de l'effluent épuré par décantation de taboue ; l'eau épurée est reprise de (3) et évacuée gravitairement,
- la boue décantée dans (3) est partiellement stockée, mais un recyclage par airlift (6) de cette boue de (3) vers le secteur (1) assure une déconcentration de (3) et le maintien d'une concentration suffisante dans (1).

Au cycle suivant, après une période de changement de cycle pendant laquelle on procède à une prédécantation dans (2)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Secteur d'entrée. 2,3 - Secteurs alternés. 4,5 - Transferts gravitaires. 6 - Recyclage de déconcentration. 7 - Entrée d'eau brute. 8 - Sortie d'eau traitée.
Figure 399. Compact Alterné (1000 à 10 000 usagers).

(par arrêt du brassage de ce secteur), on intervertit les fonctions des secteurs (2) et (3), la boue déposée dans (3) au cycle précédent est alors remise en suspension.

L'aération et le brassage sont assurés par insufflation d'air.

L'absence de pont racleur autorise une couverture complète au niveau du sol avec simplement quelques trappes d'accès, ce qui permet éventuellement une dissimulation presque totale de l'ouvrage.

1.5.3. OXYRAPID R

L'OXYRID R, destiné au traitement biologique à moyenne charge des effluents d'agglomérations importantes, est le fruit d'une très longue expérience acquise par DEGRÉMONT dans le domaine des grands appareils compacts à mélange intégral et faible temps de séjour.

L'OXYRAPID R (figure 400) de forme habituellement rectangulaire comprend :

- un bassin d'aération à mélange intégral, situé dans l'axe de l'ouvrage,
- un ou deux clarificateurs latéraux à flux vertical, équipés de ponts racleurs alternatifs,
- un recyclage rapide des boues, à débit réglable (jusqu'à 300 %), assuré par une batterie d'émulseurs d'air alimentée par les soufflantes communes à l'aération.

Le grand soin apporté à la répartition et à l'introduction de la liqueur aérée dans le clarificateur permet d'atteindre des vitesses ascensionnelles élevées et de profiter du lit de boues.

L'ouvrage peut être construit pour des longueurs unitaires de 120 m et plus.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

De par sa conception, l'OXYRAPID R se prête bien à la réalisation de blocs d'épuration compacts incorporant éventuellement le décanteur primaire.

1.5.3.1. Bassin d'aération (2)

Ce bassin est à parois verticales et fond plat. L'eau brute y est introduite sur toute la longueur de l'ouvrage par une conduite (1) noyée, munie de place en place d'orifices de répartition calibrés.

Le brassage (en double giration) et l'aération des boues activées sont effectués par insufflation d'air (5) au moyen de diffuseurs moyennes bulles (VIBRAIR, OXAZUR) ou fines bulles (DP 230, FLEXAZUR), disposés en semi-plancher.

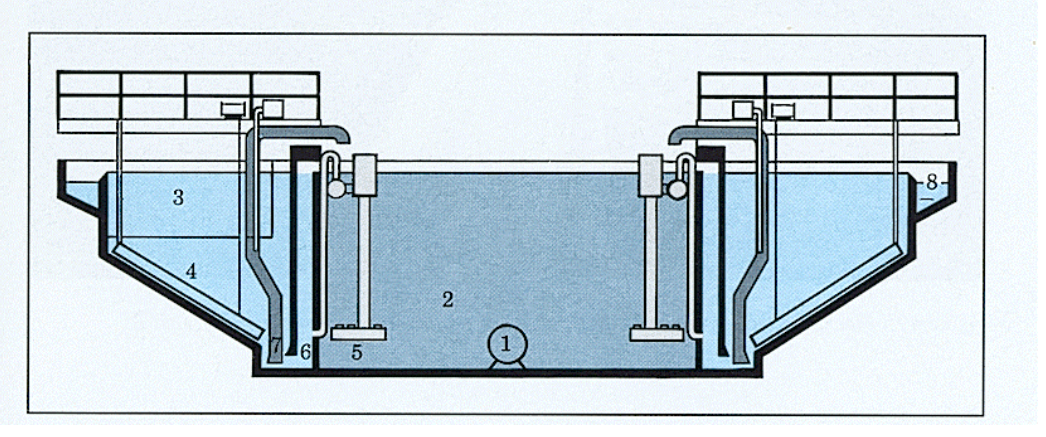
1.5.3.2. Clarificateurs (3)

La clarification s'effectue dans deux (éventuellement un seul) canaux rectangulaires (3) accolés au bassin d'aération, avec fond moyennement incliné et raclage mécanique (4) ramenant les boues déposées vers une cuvette longitudinale au pied de la paroi de séparation. La liqueur aérée entre par des pipes à inversion de flux, la délivrant dans une gaine siphoïde de large section. L'eau épurée est reprise par des rigoles longitudinales extérieures (8) avec, éventuellement, un allongement de la longueur de déversement par des éléments de rigole en épis régulièrement disposés.

Les écumes et matières flottantes en surface du clarificateur sont raclées par le pont mobile vers une boite de collecte d'extrémité.

Recyclage des boues décantées: il est assuré par une batterie de tubes émulseurs d'air (6), régulièrement disposés le long de la paroi de séparation entre aération et clarification, reprenant les boues décantées et les délivrant directement dans la masse de boues activées, en giration.

Suivant les conditions d'exploitation et la qualité des boues, le débit de recyclage peut être pulsé ou permanent



1 - Arrivée d'eau brute.
2 -Zone d'aération.
3 - Zone de clarification.
4 -Dispositif de raclage.
5 - Diffusion d'air.
6 - Recyclage des boues.
7 - Succion des boues en excès.
8 - Reprise de l'eau traitée.

Figure 400. OXYRAPID R (raclé).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Extraction des boues en excès: elle s'effectue par des émulseurs d'air à fonctionnement manuel ou automatique

- pour la plus grande part, sous forme concentrée: reprise par un tube de succion (7) porté par le pont mobile (avec ventilateur centrifuge embarqué), aspirant la boue dans le fond du clarificateur,
- pour le complément, sous forme diluée: reprise en plusieurs points, directement dans le bassin d'aération.

Automatisation: un automate programmable est bien adapté à la gestion de l'oxygénation, du recyclage des boues et de l'extraction des boues en excès.

Différents capteurs peuvent être adjoints en mesure et alarme, éventuellement en asservissement, tels que, par exemple, débitmètre d'eau brute et/ou d'eau épurée, analyseur d'O_2 dissous (action sur la production d'air), sonde de détection du voile de boue en clarification, turbidité d'eau traitée, etc.

Figure 401. Installation d HARELBEKE (Belgique). Épuration d'effluents urbains par OXYRAPID R.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. CULTURES FIXÉES

2.1. LITS A RUISSELLEMENT

2.1.1. Lits bactériens à remplissage traditionnel

Ils présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux procédés à boues activées

- surveillance plus réduite,
- économie notable d'énergie, l'air étant fourni la plupart du temps par tirage naturel à travers le lit,
- "récupération", souvent assez rapide après un choc toxique;

mais les inconvénients sont nombreux

- rendement d'épuration inférieur à charge volumique identique,
- risques de colmatage,
- plus grande sensibilité à la température,
- non maîtrise du tirage d'air (défaut d'oxygénation et odeurs),
- hauteur limitée,
- approvisionnement ou réapprovisionnement parfois difficile du matériau adéquat,
- coût de construction plus élevé,
- boues en excès généralement non stabilisées.

2.1.2. Lits bactériens à remplissage plastique

Les lits bactériens à remplissage plastique permettent de s'affranchir d'une partie de ces inconvénients. En particulier, le fort indice de vide des matériaux utilisés réduit considérablement les risques de colmatage. En outre, le poids du remplissage plastique étant bien inférieur à celui des remplissages minéraux, il est possible de concevoir des installations plus hautes, réduisant ainsi la surface occupée. Un autre intérêt réside dans les surfaces développées plus importantes et le meilleur tirage naturel d'air, qui permettent, par conséquent, de travailler à des charges volumiques supérieures.

Les lits bactériens plastiques sont particulièrement adaptés au traitement des ERI

- prétraitement d'eaux résiduaires concentrées d'industries agro-alimentaires (laiteries...),
- traitement d'eaux de raffineries, etc.

Il est déconseillé d'attendre d'un lit bactérien à remplissage plastique une efficacité trop élevée (supérieure à environ 80 % sur la DBO_5 Elle serait difficile à obtenir et entraînerait des coûts d'investissement et d'exploitation prohibitifs. Il ne faut également pas prévoir de traiter des eaux trop concentrées en $DB0_5$ (concentration supérieure à 2 500 $mg.l^{-1}$ environ), car d'autres techniques, telles que la méthanisation, permettent alors d'obtenir des résultats supérieurs avec de plus faibles dépenses d'énergie et production d'un biogaz valorisable.

2.1.2.1. Dispositions générales

a) Forme du lit bactérien et répartition hydraulique

En général, pour assurer une bonne répartition hydraulique de l'effluent, les lits bactériens sont de forme circulaire ou polygonale (alimentation par distributeur rotatif). Pour les lits bactériens

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

rectangulaires, la répartition peut être assurée par des distributeurs fixes, ou une combinaison de distributeurs fixes et rotatifs.

L'inconvénient des systèmes fixes, comportant de plus petits orifices, est de nécessiter des moyens d'accès pour le décolmatage périodique des orifices de répartition. Ce décolmatage périodique est à prévoir sur la plupart des effluents car, quelle que soit la qualité du prétraitement, la présence de détritus capables de boucher les orifices de répartition de l'eau est inévitable.

b) Structure du lit bactérien

Dans le cas de matériaux ordonnés, les remplissages plastiques étant auto-portants, la structure extérieure peut théoriquement être calculée seulement pour
résister à la poussée du vent. Les parois externes du lit sont généralement construites autour d'un cadre de béton, de bois ou de poteaux métalliques; un film plastique est alors tendu, évitant les projections extérieures.

Dans le cas de matériaux en vrac, l'enveloppe extérieure doit normalement être calculée pour résister à la pression de l'eau sur toute la hauteur du lit.

Systèmes d'aération: l'aération est assurée par des ouvertures aménagées à la base du lit. Dans le cas de lits couverts (figure 402), ces ouvertures sont reliées par des gaines à des ventilateurs. La surface minimale des orifices doit représenter 2 % de la surface développée de la tour. Il est conseillé cependant, avec des effluents industriels à forte charge polluante, d'avoir une surface supérieure. Dans le cas de basses températures, il est souhaitable d'avoir la possibilité d'obturer en partie les entrées d'air, par un système de volets par exemple.

Supportage du matériau: le supportage du matériau est assuré soit par un caillebotis, soit par un système de poutrelles métalliques ou en bois.

La solution varie suivant le type de matériau choisi. Le dessin de ce supportage doit être particulièrement étudié car le plus souvent les amorces de colmatage du lit se produisent à ce niveau.

c) Recirculation hydraulique

Pour éviter le colmatage d'un lit bactérien, dû à une croissance excessive du biofilm, il est nécessaire de travailler avec une charge hydraulique minimale, variable suivant le type d'eau résiduaire et la nature du matériau choisi. Dans la plupart des cas, il est nécessaire d'effectuer un recyclage. La charge hydraulique instantanée, continue ou discontinue, se situe entre 1,5 et 5 $m^3/m^2.h$. Le recyclage est normalement effectué directement à la sortie du lit bactérien. Si la production de MES est élevée, il peut être préférable d'effectuer ce recyclage à partir du décanteur situé en aval, mais alors le dimensionnement de celui-ci est plus important.

d) Protection

Contre le froid: les lits bactériens à remplissage plastique se comportent comme des tours de refroidissement. L'hiver, on peut noter un abaissement important de la température. Il est recommandé, dans les pays froids, de limiter les pertes thermiques par l'utilisation d'un double bardage et d'une couverture, ainsi que par le contrôle de la ventilation.

Contre la corrosion: une attention particulière doit être apportée à la protection des parties métalliques, surtout dans la zone de distribution et sur le plancher support. Des corrosions sont à craindre essentiellement dans le cas de risques de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

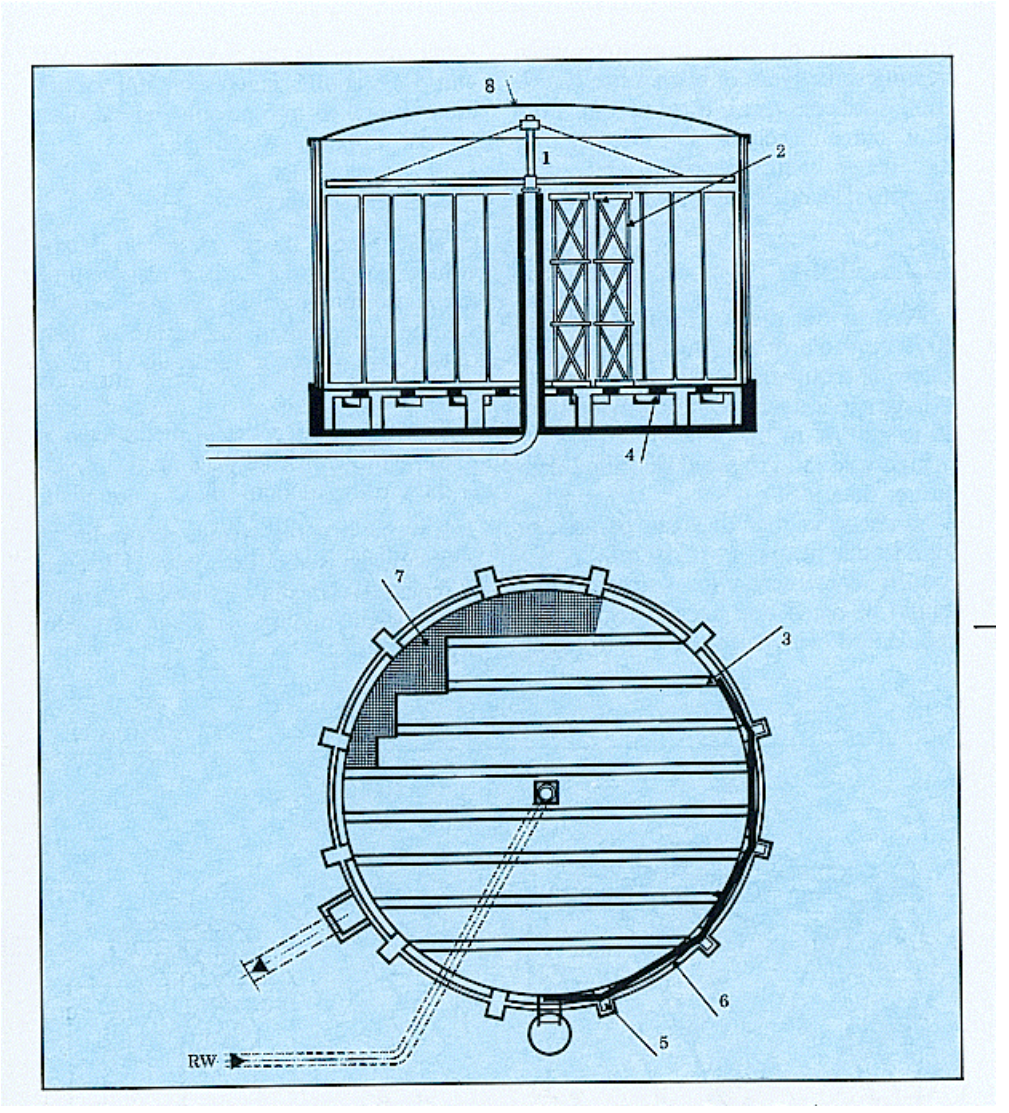


Figure 402. Coupe de lit bactérien à remplissage plastique.

1 - Distributeur rotatif.
2 - Matériau ordonné en cadres.
3 - Poutraison support.
4 - Ouvertures d'aération.
5 - Poteaux.
6 - Bardage.
7 - Caillebotis de pourtour.
8 - Couverture éventuelle.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

dégagement de H_2S et de température élevée de l'eau.

Contre les nuisances: dans le traitement de certaines eaux résiduaires (brasseries, distilleries, etc.), les lits bactériens peuvent être une source d'odeurs non négligeable. Il est alors nécessaire de les couvrir et parfois de désodoriser l'air de tirage.

2.1.2.2. Corps de contact

La plupart des matériaux de contact (figure 403) disponibles sur le marché répondent aux exigences suivantes :

- surface spécifique importante, variant de 80 à 220 $m^2.m^{-3}$,
- indice de vide élevé pour éviter le colmatage (souvent supérieur à 90 %),
- légèreté, de manière à pouvoir être utilisés sur des hauteurs importantes (4 à 10 m),
- résistance mécanique suffisante. Il est à noter qu'une fois en service normal et chargé de zooglée et d'eau de ruissellement, le matériau peut peser entre 300 et 350 $kg.m^{-3}$. Des valeurs de 500 $kg.m^{-3}$ sont souvent prises en compte pour le calcul du système de supportage,
- inertie biologique,
- stabilité chimique.

Les matériaux plastiques diffèrent par la forme, qui conditionne le rapport surface/volume, par l'alvéolage, par le rapport poids/volume et par la nature du matériau constituant (PCV ou polypropylène en général).

On peut distinguer deux grands types de présentation

- matériaux à remplissage ordonné,
- matériaux à remplissage en vrac.

Il apparaît que la durée de vie moyenne des matériaux à remplissage plastique est de l'ordre d'une dizaine d'années. Leur remplacement est occasionné par différents phénomènes: encrassement, écrasement, défauts de supportage, etc.

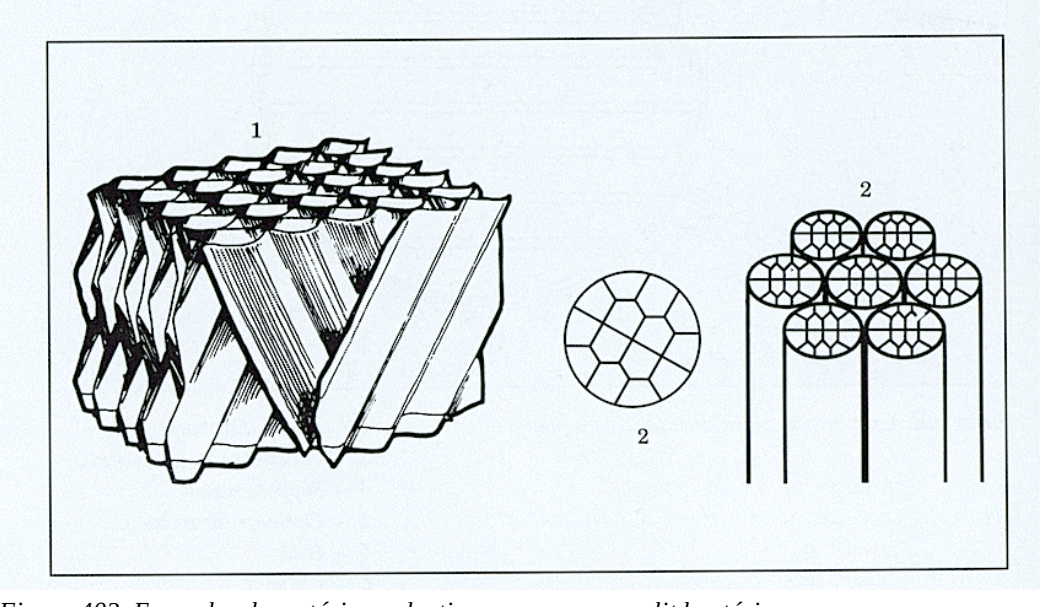


Figure 403. Exemples de matériaux plastiques en vrac pour lit bactérien.
1 -Mass Transfer. 2 - Flocor R.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

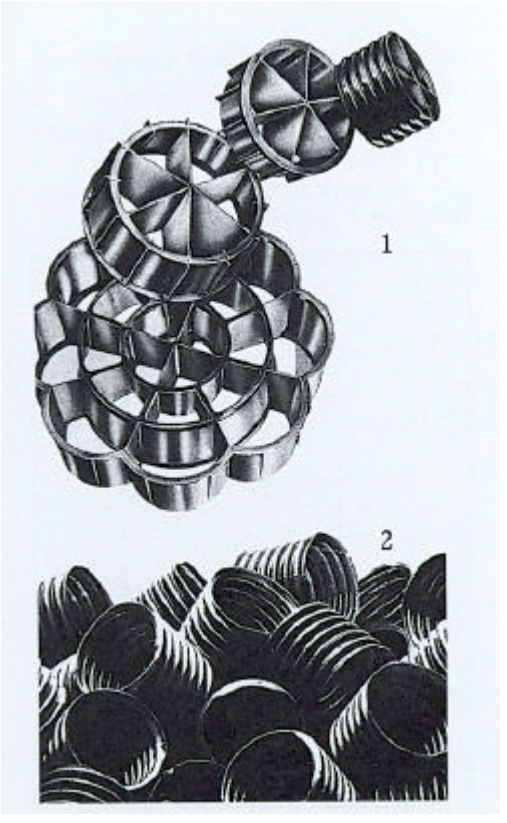


Figure 404. Exemples de matériaux plastiques ordonnés pour lit bactérien
1 - Plasdek. 2 - Cloisonyle.

2.1.2.3. Rendement d'épuration

a) Équation de dimensionnement

$$\frac{S_o}{S_f} = \exp\left(K A_s \frac{H}{Q^n}\right)$$

Dans laquelle

S_o = $DB0_5$ de l'eau brut, après décantation ($mg.l^{-1}$),

S_f = $DB0_5$ de l'eau sortie du lit bactérien, après décantation ($mg.l^{-1}$),

A_S = surface spécifique du matériau plastique considéré ($m^2.m^{-3}$),

H = hauteur de remplissage (mètres),

Q = charge hydraulique exprimée en $m^3.j^{-1}$ par m^2 de section du lit Cette charge ne tient pas compte du recyclage et n'est donc calculée que sur le débit traité,

n = coefficient calculé expérimentalement. La relation suivante est la plus satisfaisante

$$n = 0{,}91 - \frac{21{,}48}{A_s}$$

K = constante de biodégradabilité dépendant de la nature de la pollution que l'on se propose de traiter, et de la température.

Le tableau suivant donne les valeurs de la constante K pour quelques types d'eaux résiduaires.

Nature de l'effluent	Valeur de K
Abattoirs	0,0082
Abattoirs de volailles	0,0189
Laiteries	0,0108
Conserveries fruits - légumes	0,0153
Brasseries	0,0101
Huileries (olives)	0,0140
ERU	0,0226

A titre d'exemple, la figure 405 donne, pour ces différents types d'eaux résiduaires, le volume de matériau Cloisonyle (surface spécifique de 130 $m^2.m^{-3}$ à mettre en oeuvre pour une hauteur de remplissage de 7 m, en fonction du rendement de dépollution souhaité.

L'équation précédente appelle quelques remarques

1°) En-dessous de 10-12 °C dans l'eau de percolation, il y a une chute sensible du rendement et il est nécessaire d'en tenir compte en région froide. Par contre, pour des valeurs supérieures, l'influence favorable de la température est moins nette.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2°) Pour obtenir un rendement donné, il vaut mieux travailler avec une hauteur importante de matériau et une section de lit plus faible, qu'avec une faible hauteur et une section plus importante.

3°) Pour une charge hydraulique donnée, le rapport S_o/S_f est pratiquement indépendant de la concentration de l'effluent entrant. Ceci n'est vrai que dans une certaine plage de concentration (de 200 à 1000 $g.m^{-3}$ de DBO_5 environ).

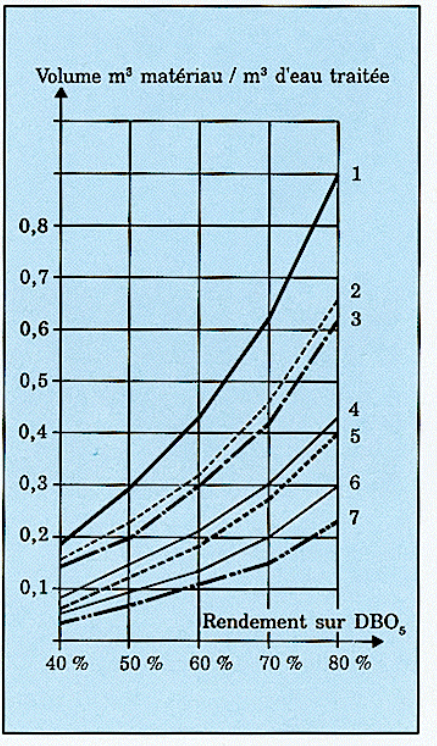
4°) L'expérience montre que l'inffluence du taux de recyclage est pratiquement négligeable sur le rendement d'un lit bactérien à remplissage plastique. Mais ce recyclage est toutefois absolument indispensable pour maintenir la charge hydraulique minimale en-deçà de laquelle il n'y aurait pas autocurage.

b) Rôle du décanteur aval

Les rendements d'épuration annoncés correspondent généralement à un effluent décanté, voire filtré; or, dans le cas de lit bactérien utilisé en prétraitement d'un effluent industriel avant rejet à l'égout municipal, le décanteur aval est souvent supprimé de façon à affranchir l'industriel du problème des boues. Le rendement d'épuration réel peut être alors nettement inférieur.

Si un lit bactérien utilisé en prétraitement est incorporé à la station d'épuration en amont d'un stade de boues activées, un décanteur intermédiaire permet d'extraire les boues en excès très fermentescibles et non minéralisées, relâchées sporadiquement. Ces boues accroîtraient notablement la demande en oxygène de la deuxième étape de traitement. Les quantités de boues en excès produites par le lit bactérien sont particulièrement importantes si l'effluent brut est chargé de matières en suspension et n'est pas préalablement décanté.

La décantabilité des boues (fragments de filin biologique) lâchées par un lit bactérien de prétraitement est bonne, mais l'eau interstitielle est très trouble.



1 – Abattoirs.
2 – Brasseries.
3 – Laiteries.
4 – Huileries.
5 – Conserveries.
6 – Abattoirs de volailles.
7 – ERU.

Figure 405. Rendements d'élimination de la DBO_5 sur lit CLOISONYLE.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 406. Brasserie SAN MIGUEL (Philippines]. Capacité: 14 t DBO_5 par jour. Lit bactérien de prétraitement.

2.2. LES LITS GRANULAIRES FIXES

DEGRÉMONT a mis en œuvre ces techniques à LA-BARRE-DE-MONTS dès 1973 sur des ERU, à MOBIL OIL À NOTRE-DAME-DE-GRAVENCHON dès 1980 sur des ERI.

Les progrès accomplis font que, maintenant, la biofiltration est devenue un procédé d'épuration particulièrement attractif. En traitement d'ERU, elle permet de réaliser à la fois une épuration biologique secondaire (élimination du carbone et de l'azote) et une rétention des MES. En traitement d'EP, ces procédés sont particulièrement bien adaptés à la nitrification et à la dénitrification.

Le terme de biofiltration est souvent utilisé pour couvrir l'ensemble des procédés qui associent une épuration biologique et une rétention des MES. Suivant les caractéristiques du matériau support, l'effet de clarification peut varier sensiblement. Initialement, le terme anglo-saxon de biofiltre a été donné aux lits bactériens à faible charge, remplis de matériaux grossiers, de plusieurs centimètres, et fonctionnant souvent sans décanteur secondaire. La teneur en MES de l'effluent traité dépassait alors 50 $mg.l^{-1}$. L'ancien procédé de filtration lente d'EP, sur sable fin (moins de 1 mm de TE), est un autre type de biofiltration d'eaux beaucoup moins chargées et conduisant à des eaux traitées de très faible turbidité. Le terme de biofiltration, utilisé en traitement d'ERU, recouvre le plus souvent des procédés conduisant à la production d'eau traitée conforme aux normes habituelles de rejet, c'est-à-dire présentant des teneurs en MES de quelques dizaines de mgl^{-1}.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ces techniques mettent en œuvre une biomasse de concentration et surtout d'activité plus élevées qu'une boue activée et présentent les avantages suivants

- gain de place, dû en particulier à la suppression de l'étage de clarification des eaux résiduaires. Cette compacité facilite la couverture des ouvrages, la maîtrise des nuisances (olfactives et sonores) et la réalisation de stations esthétiques,
- pas de risque de lessivage puisque la biomasse est fixée sur un support permettant de faire face à des variations de débit, - facile adaptation aux eaux résiduaires diluées,
- remise en activité rapide, même après un arrêt prolongé de plusieurs mois,
- construction modulaire et facilité d'automatisation.

L'oxygénation peut être réalisée par dissolution préalable d'oxygène de l'air ou d'oxygène pur, ou par transfert direct d'air dans le réacteur. Dans ce dernier cas, le sens respectif de passage de l'air et de l'eau présente une grande importance. En effet, la pratique de la filtration d'eau potable a amené, dans une première approche, à réaliser des réacteurs à flux descendant et à contre-courant d'air

cette technique conduit au freinage et à la coalescence des bulles d'air injectées, d'où la formation de poches gazeuses dans la masse granulaire. C'est le phénomène de **l'embolie gazeuse** qui implique les inconvénients suivants

- augmentation de la perte de charge avec réduction du débit traité et augmentation des fréquences de lavage,
- nécessité d'accroître inutilement en permanence le débit d'"air de procédé" : celui-ci devient imposé, non plus par les besoins biologiques, mais par les besoins mécaniques et hydrauliques,
- cette injection d'air excessive provoque une turbulence réduisant la capacité de rétention des MES.

Ces différentes raisons ont conduit DEGRÉMONT, dans le cas du transfert direct, à opter pour les techniques de co-courant air - eau, soit en flux ascendant **(BIOFOR),** soit en flux descendant **(BIODROF).** Une exception est cependant à signaler: c'est celle de la nitrification d'eau potable dans laquelle on cherche également une eau traitée limpide. Les concentrations peu importantes des MES dans l'effluent à traiter, liées au faible taux de croissance des bactéries nitrifiantes, limitent fortement le colmatage et, par conséquent, les risques d'embolie gazeuse. Il est possible, dans ce cas, d'utiliser un contre-courant air - eau (procédé **NITRAZUR).**

Chaque technique de biofiltration présente, compte tenu de ses caractéristiques propres, un créneau d'utilisation bien précis.

2.2.1. Matériaux de remplissage

BIOLITE

Le matériau de remplissage a un double rôle

- support de micro-organismes,
- effet filtrant.

Le choix d'un support adapté est fondamental et dépend du type de réacteur envisagé, de la nature de l'effluent à traiter (EP, ERU ou ERI, après prétraitement, décantion primaire ou traitement biologique secondaire).

DEGRÉMONT a développé une famille de matériaux dénommés BIOLITE (L, P, F) dont les TE peuvent varier de 1 à 4 mm et la masse volumique granulaire de 1,4 à 1,8 $g.cm^{-3}$.. Ils présentent les caractéristiques communes suivantes

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- état de surface favorable au développement bactérien,
- faible friabilité et faible perte à l'acide.

2.2.2. BIOFOR (Biological Filtration Oxygenated Reactor)

2.2.2.1. Description

Il s'agit d'un système de filtration biologique **aérobie en flux d'air et d'eau ascendants** (figure 407). L'oxygénation est donc réalisée par introduction d'air à co-courant.

Une installation BIOFOR comporte principalement (figure 408)

- une batterie de réacteurs identiques construits généralement en béton (1), fonctionnant en parallèle (ou éventuellement deux batteries en série, dans le cas d'un couplage élimination de pollution carbonée-nitrification),
- un ouvrage de répartition de l'eau à traiter (2),
- une galerie d'accès aux vannes automatiques et réseaux de conduites, aux fonds de filtres, vidanges... (3),
- un local attenant pour les pompes de lavage (4),
- un local pour les différents surpresseurs et compresseurs d'air (5),
- une bâche d'eau traitée pour eau de lavage (6),
- éventuellement, une bâche de stockage des boues de lavage avec pompes d'évacuation (7).

Chaque réacteur, constitué d'un cuvelage rectangulaire en béton, comp orte

- un puits d'alimentation d'eau à traiter équipé d'un tamis de protection,
- un plancher support des matériaux granulaires, en dalles préfabriquées,
- deux déversoirs frontaux, avec plan incliné amont pour la reprise de l'eau traitée et de l'eau de lavage. Ces déversoirs sont protégés par un piège à matériau constitué d'une herse de tranquillisation éliminant les turbulences, en particulier 733 en séquence de lavage air + eau du cycle de lavage (figure 409),
- une goulotte frontale de collecte des eaux traitées, propre à chaque réacteur, et une partie du canal de collecte des eaux sales, commun à la batterie de réacteurs.

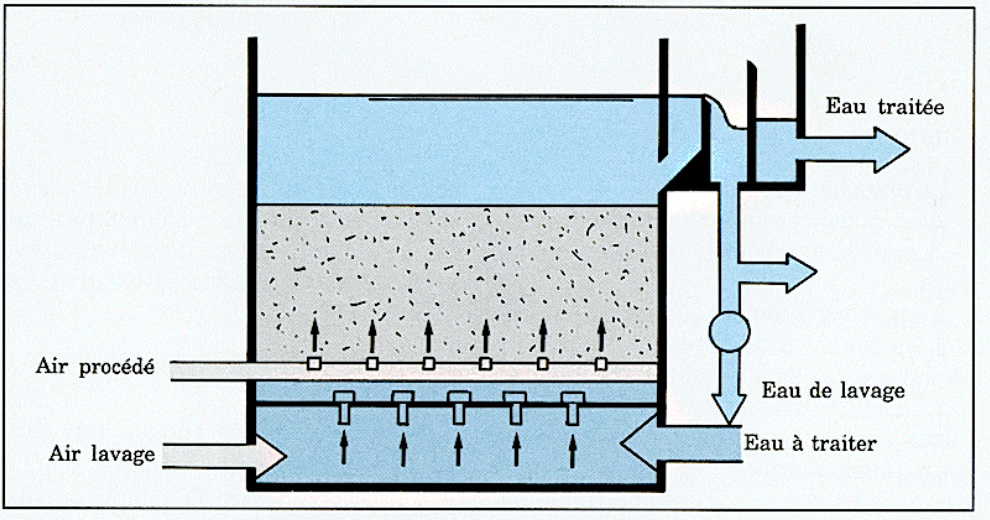


Figure 407. Schéma de principe du BIOFOR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

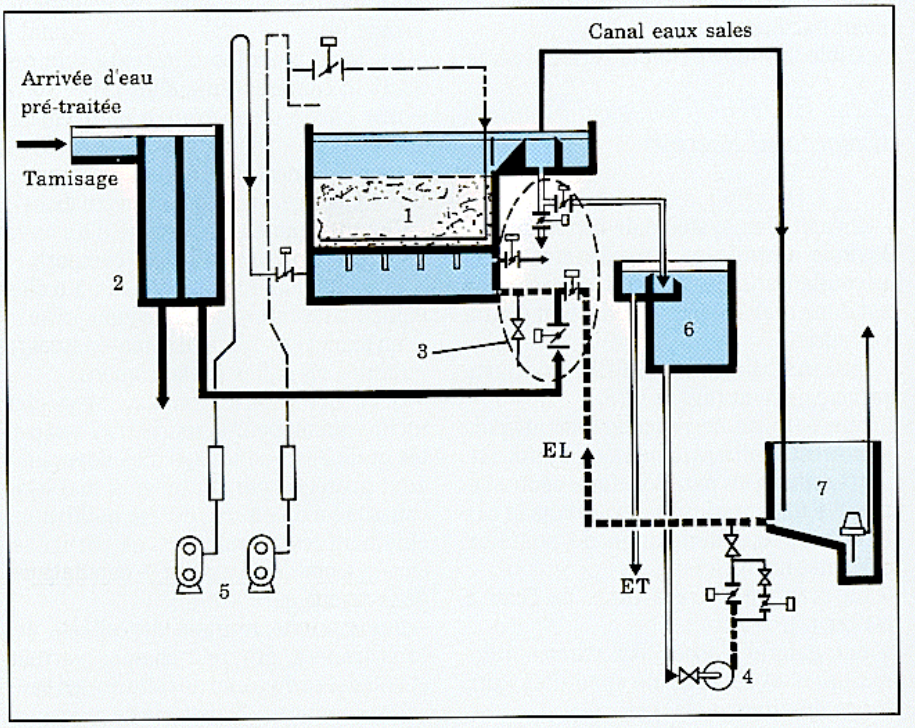


Figure 408. Schéma d'une station avec BIOFOR.

Le plancher supporte:

- deux couches - supports intermédiaires, - 3 mètres environ de matériau spécifique.

L'équirépartition des fluides introduits sous le plancher de filtre (eau brute, eau de lavage, air de lavage) est assurée par 55 buselures par m² environ. Ces buselures sont spécialement adaptées aux eaux résiduaires.

L'introduction et l'équirépartition de l'air "procédé" sont assurées par un ensemble de collecteurs maillés placés sur le plancer de filtre. L'équirépartition de l'air dans la masse du matériau support est assurée par des **diffuseurs OXAZUR** (p. 710).

Deux types de matériaux sont couramment utilisés

- la BIOLITE 2,7 de TE comprise entre 2,5 et 2,9 mm,
- la BIOLITE 3,5 de TE comprise entre 3,2 et 3,8 mm.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans le cas d'effluents peu chargés et devant répondre à des normes sévères sur les MES, on utilise du sable de TE 1,35 mm: ce peut être le cas pour une nitrification sur BIOFOR, en aval d'un premier BIOFOR éliminant la pollution carbonée.

2.2.2.2. Fonctionnement - Automatisme **a) Cycle de traitement** : l'eau brute est introduite sous le plancher du réacteur. Le nombre d'unités en service peut être éventuellement lié au débit à traiter.

L'introduction d'air "procédé" est permanente sur les réacteurs en service. Chacun de ceux-ci est équipé d'un surpresseur qui lui est propre, de façon à s'affranchir des variations de perte de charge d'un réacteur à l'autre.

L'eau traitée, reprise par le déversoir frontal, est évacuée gravitairement à l'exutoire après remplissage de la réserve d'eau épurée.

b) Cycle de lavage: celui-ci est enclenché automatiquement à partir d'un programmeur horaire, ou éventuellement plus tôt si la perte de charge maximale tolérée est atteinte. Tout le cycle de lavage est automatique et dure de 30 à 40 minutes; il comprend une phase de lavage proprement dit (à l'air et à l'eau) et une phase de rinçage. Les techniques mises en oeuvre sont très proches de celles décrites page 775.

L'air de lavage est fourni par un surpresseur commun à l'ensemble des BIOFOR. Les eaux de lavage représentent de 5 à 10 % du volume des eaux filtrées.

c) Automatisme: la gestion des cycles de lavage et la commande des machines tournantes et des vannes automatiques sont assurées à partir d'un automate programmable.

2.2.2.3. Domaine d'emploi et résultats de fonctionnement

Le BIOFOR est normalement mis en oeuvre après décantation primaire ou flottation (celles-ci pouvant être précédées

Figure 409. Installation de GRÉOUX-LES-BAINS (Alpes-de-Haute-Provence). Débit. 4 000 m^3 j^{-1}. Épuration d ERU Vue d'un des 4 réacteurs BIOFOR de surfaceunitaire 14,1 m^2.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 410. Installation de MÉTABIEF (Doubs). Débit maximum: 2300 $m^3.j^{-1}$. Épuration d ERU. 4 BIOFOR de surface unitaire 10,5 m^2.

d'une floculation). Le domaine d'utilisation de cette technique est:

- élimination de la DBO_5 d'effluents de concentration inférieure à 300 mg. l^{-1},
- rétention des MES d'effluents de concentration inférieure à 150 mg.l^{-1},
- élimination de l'ammoniaque par oxydation en nitrate (il est à noter que l'ammonification est faible du fait des courts temps de séjour),
- dénitrification d'eau nitrifiée avec suppression de l'injection d'air procédé.

a) Production de boues en excès

La production de boues en excès est plus importante qu'avec les boues activées à faible charge. Les temps de séjour plus courts de l'eau, la faible dégradation des MES et une rétention plus élevée de ces dernières expliquent ce phénomène.

Les eaux de lavage, dont la concentration en MES est de l'ordre de 2 et 3 g.l^{-1} sont, soit retournées en aval du prétraitement si la station possède une décantation ou une flottation, soit traitées séparément par décantation ou flottation avant rejet dans le milieu naturel.

b) Résultats

Air procédé - Capacité d'oxygénation - Dépenses énergétiques: le débit d'air insufflé peut varier, suivant les conditions du traitement, entre 4 et 15 $Nm^3.m^{-2}$ de surface de réacteur et par heure. Le rendement de transfert d'oxygène, en conditions effectives de traitement, étant de l'ordre de 20 %, la capacité d'oxygénation Pleut varier entre 0,3 et 0,9 kg d'O_2/m^2.h. La dépense énergétique d'oxygénation peut se limiter à 0,75 kWh par kg de $DB0_5$ éliminée (à pleine charge). A cette dépense énergétique, il est nécessaire de rajouter celle liée au lavage périodique du matériau (air et eau) : celle-ci est de l'ordre de 0,1 kWh par kg de $DB0_5$ éliminée.

Élimination des MES: les performances du BIOFOR dépendent du choix du matériau, de la charge hydraulique sur les réacteurs et de la concentration en MES

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de l'eau brute. En traitement d'ERU, le taux d'élimination des MES d'une eau à traiter présentant une teneur en MES initiale de l'ordre de 100 mg.l-^{1}, varie de 85 à 70 % pour les vitesses allant de 2 à 6 m.h^{-1}.

La capacité de stockage de MES entre lavages est comprise entre 1,5 et 2 kg.m^{-3} de matériau.

Élimination de la DB05 (figure 411) contrairement aux MES, l'élimination de

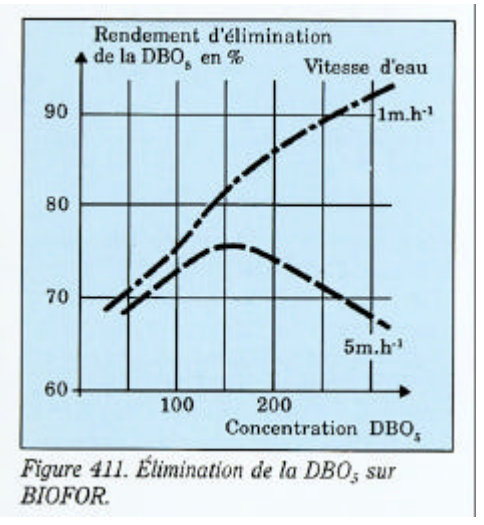


Figure 411. Élimination de la DBO_5 sur BIOFOR.

La DBO_5 est peu affectée par la TE du matériau utilisé. Sur des ERU décantées, moyennement concentrées, les charges volumiques adoptées sont comprises entre 2 et 6 kg DBO_5/m^3.j, pour lesquelles les rendements d'élimination de la $DB0_5$ varient entre 85 et 75 %.

Oxydation de l'ammoniaque en nitrates

(figure 412) : sur une ERU, après élimination de la pollution carbonée, il est possible, à 20 °C, de nitrifier 1 kg de N-NH_4 /m^3.j. A 12 °C, cette charge n'est plus que de 0,45 kg N-NH_4/m^3.j.

Les courbes des figures 411 et 412 ont été établies sur des ERU.

2.2.3. BIODROF (Biological Dry Oxygenated Filter)

2.2.3.1. Description

Dans ce procédé (figure 413), l'effluent à traiter ruisselle à travers le lit de matériau granulaire. Ce ruissellement permet le transfert d'oxygène au sein de la masse active sans avoir à recourir à une injection directe d'air dans le réacteur. La circulation de l'air se fait à co-courant de l'eau, en créant une dépression à la partie inférieure du réacteur.

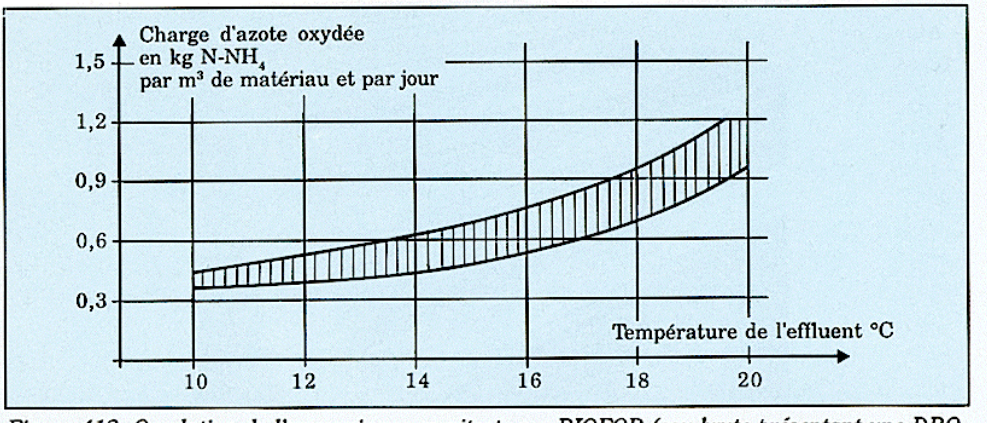


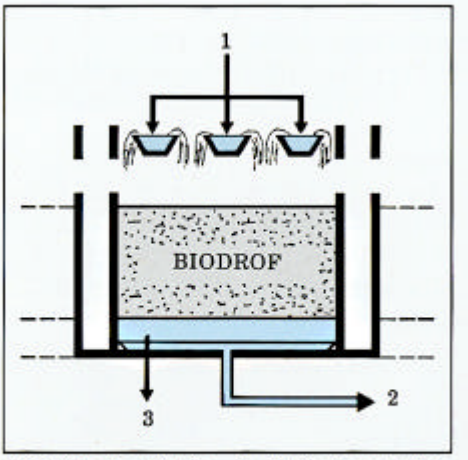
Figure 412. Oxydation de l'ammoniaque en nitrate sur BIOFOR (eau brute présentant une DBO_5 inférieure à 60 mg.l^{-1}).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'eau est répartie régulièrement à la surface du lit, par un réseau de goulottes ou par des distributeurs rotatifs ou alternatifs. Elle ruisselle à travers une précouche de dispersion, puis dans le lit, vers le radier où elle est évacuée par un collecteur ou un canal de fond.

Un joint hydraulique permet de maintenir la dépression régnant sous le plancher. Cette dépression varie de 0 à 150 cm de CE. La vitesse de l'air doit être suffisamment élevée pour assurer une bonne pénétration des MES dans le lit du matériau et favoriser l'oxygénation de la biomasse.

La hauteur de matériau est voisine de 2 m.



1. Entrée d'eau brute. – 2. Sortie d'eau traitée. 3. Mise en dépression.
Figure 413. Principe du BIODROF.

2.2.3.2. Fonctionnement

Le BIODROF est utilisé en élimination simultanée de pollution carbonée et de MES, sur ERU ou sur certaines ERI, soit directement après un traitement primaire, soit en traitement de finition après une installation existante.

Le lavage du matériau intervient dès que la dépression interne ou la durée de cycle atteignent une valeur prédéterminée. Après remplissage du biofiltre, ce lavage comprend les phases classiques de lavage d'un filtre à l'eau et à l'air.

La durée totale de ces opérations, y compris purge et vidange, est de l'ordre de 45 minutes. Comme dans le cas du BIOFOR, le volume d'eau de lavage représente de 5 à 10 % du volume d'eau filtrée. Ces eaux de lavage suivent le circuit précédemment décrit pour le BIOFOR.

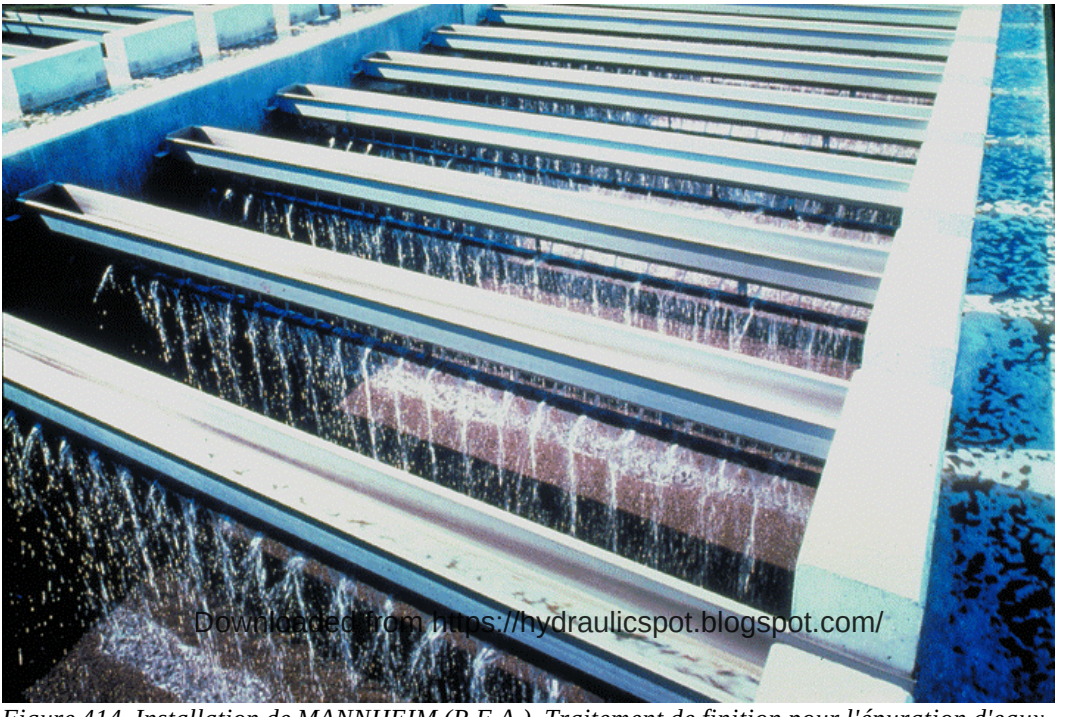

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 414. Installation de MANNHEIM (R.F.A.). Traitement de finition pour l'épuration d'eaux résiduaires urbaines. Débit maximal: 14 000 $m^3.h^{-1}$. 32 BIODROF (surface unitaire 87 m^2).

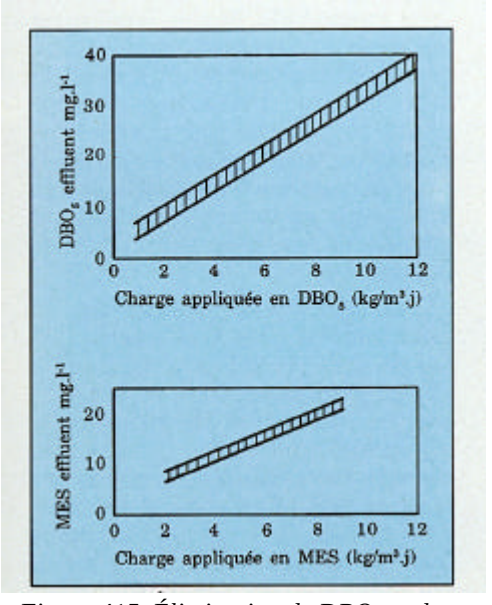
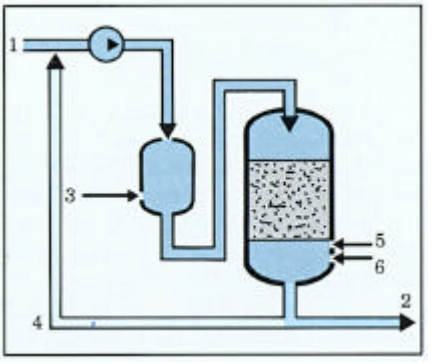


Figure 415. Élimination de DBO_5 et de MES sur BIODROF



1- Effluent à traiter
2- Effluent traité
3- Air procédé sur oxygène pur
4- Recyclage éventuel
5- Air de lavage
6- Eau de lavage

Figure 416. Filtration avec prédissolution d'oxygène pur ou d'air.

2.2.3.3. Conditions d'emploi et résultats

Le procédé BIODROF est intéressant en traitement tertiaire ou sur des effluents très dilués

Les courbes de la figure 415 donnent les résultats obtenus sur des ERU canadiennes contenant en moyenne 65 $mg.l^{-1}$.de MES et 75 $mg.l^{-1}$ de DBO_5

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 417. Installation d'OBERNAI (Haut-Rhin) pour la Brasserie KRONENBOURG. Débit: 15000 $m^3.j^{-1}$. Traitement tertiaire par filtration sur BIOLITE avec prédissolution d'air.

2.2.4. Filtration avec pré-dissolution d'air ou d'oxygène (OXYAZUR)

La **pré-dissolution d'air** sous pression permet de travailler en système diphasique dans le biofiltre. L'effet filtrant du matériau (en général BIOLITE) n'est pas perturbé par la présence de bulles d'air, ce qui permet d'obtenir un rendement élevé **d'élimination des MES.** Les filtres utilisés sont du type à flux descendant. Cette technique est surtout mise en ceuvre en affinage, pour l'élimination des matières en suspension, lorsque la DBO résiduelle de l'eau à traiter est faible. Sur des eaux plus polluées, on augmente les possibilités d'élimination de la pollution organique, par recyclage de l'eau traitée, ce qui présente l'inconvénient d'augmenter la vitesse de filtration, ou mieux, par emploi **d'oxygène pur** sous pression (voir figure 416).

2.2.5. NITRAZUR

Le procédé NITRAZUR recouvre les techniques d'élimination de l'azote en vue de la production d'eau potable. Le procédé est applicable soit pour la nitrification (oxydation de l'ammonium en nitrate), soit en dénitrification (élimination des nitrates sous forme d'azote).

2.2.5.1. NITRAZUR N (Nitrification)

La concentration en ammonium après traitement doit être très inférieure aux valeurs recherchées en ERU (0,05 $mg.l^{-1}$ selon normes CEE). De plus, le milieu est très carencé en substrat nutritif.

Le matériau support utilisé est la BIOLITE L qui a été reconnu comme étant le plus efficace pour la nitratation (transformation des nitrites en nitrates) ; cette réaction a en effet une cinétique plus lente que la nitritation ($NH_4 \rightarrow NO_2$) et c'est elle qui est le facteur limitant de la nitrification.

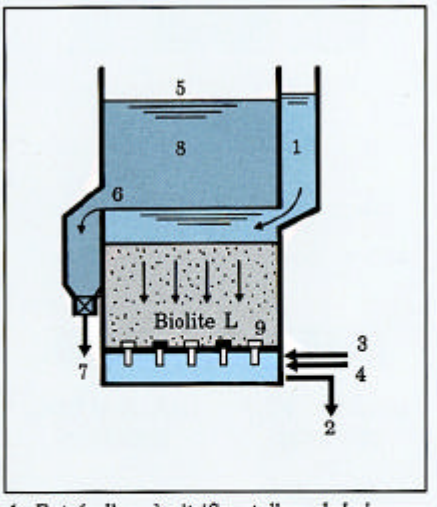
Le NITRAZUR N peut être mis en ceuvre soit à courant d'eau ascendant et son efficacité est alors maximale, soit à courant d'eau descendant: on bénéficie dans ce cas d'un effet filtrant supérieur qui permet de retenir une quantité plus importante de MES. Il est représenté par la figure 418. Le plancher support (9) est équipé de deux types de buselures dont l'un est réservé à l'introduction de l'air de procédé. Cet air de procédé permet de maintenir une concentration suffisante en oxygène dans toute la profondeur du matériau. Il est ainsi possible de nitrifier des eaux contenant plus de 2 $mg.l^{-1}$ de NH, Pendant le lavage, les deux types de buselures sont utilisés pour l'injection simultanée de l'air et de l'eau de lavage. Afin d'éviter le départ de matériau léger, la zone (8) est utilisée pour le stockage de l'eau boueuse pendant la phase de lavage "air et eau"; l'eau boueuse est ensuite évacuée par le canal et la vanne (7). Pendant le rinçage, le niveau d'eau est maintenu au niveau du déversoir de lavage (6) ; cette phase est raccourcie grâce au balayage effectué au moyen d'eau à nitrifier.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.5.2. NITRAZUR DN (dénitrification)

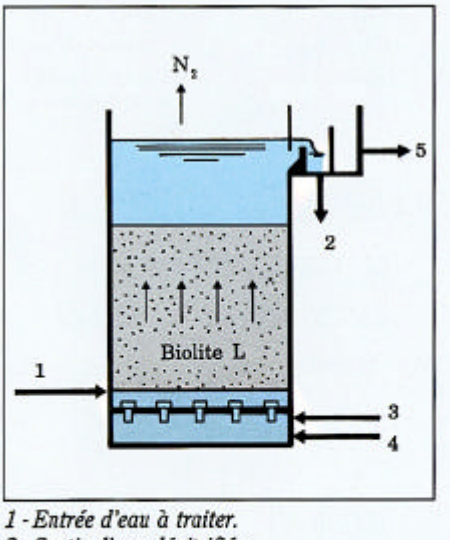
Dans ce procédé, le réacteur (figure 419) met en ceuvre des bactéries qui ne sont pas aérobies strictes et qui utilis ent pour leur métabolisme l'oxygène des nitrates

le réacteur fonctionne en condition anoxie. Le matériau support est la BIOLITE L. Le sens de fonctionnement est à **courant ascendant:** ce sens de passage favorise l'élimination de l'azote gazeux, produit final de la réaction de dénitrification. Un sens de passage à courant descendant aurait pour effet d'accumuler l'azote au sein du réacteur, et d'augmenter ainsi la perte de charge de façon importante. L'eau à dénitrifier est introduite, avec ses réactifs, à la base du réacteur (1). L'eau dénitrifiée est reprise en surface (2). Le plancher est équipé d'un seul type de buselure.



1 - Entrée d'eau à nitrifier et d'eau de balayage.
2 - Sortie d'eau nitrifiée.
3 - Air de procédé.
4 - Air et eau de lavage.
5 - Niveau de fonctionnement normal.
6 - Niveau de rinçage.
7 - Départ d'eau de lavage.
8 - Stockage des eaux sales.
9 - Plancher à buselures.

Figure 418. NITRAZUR N en nitrification.



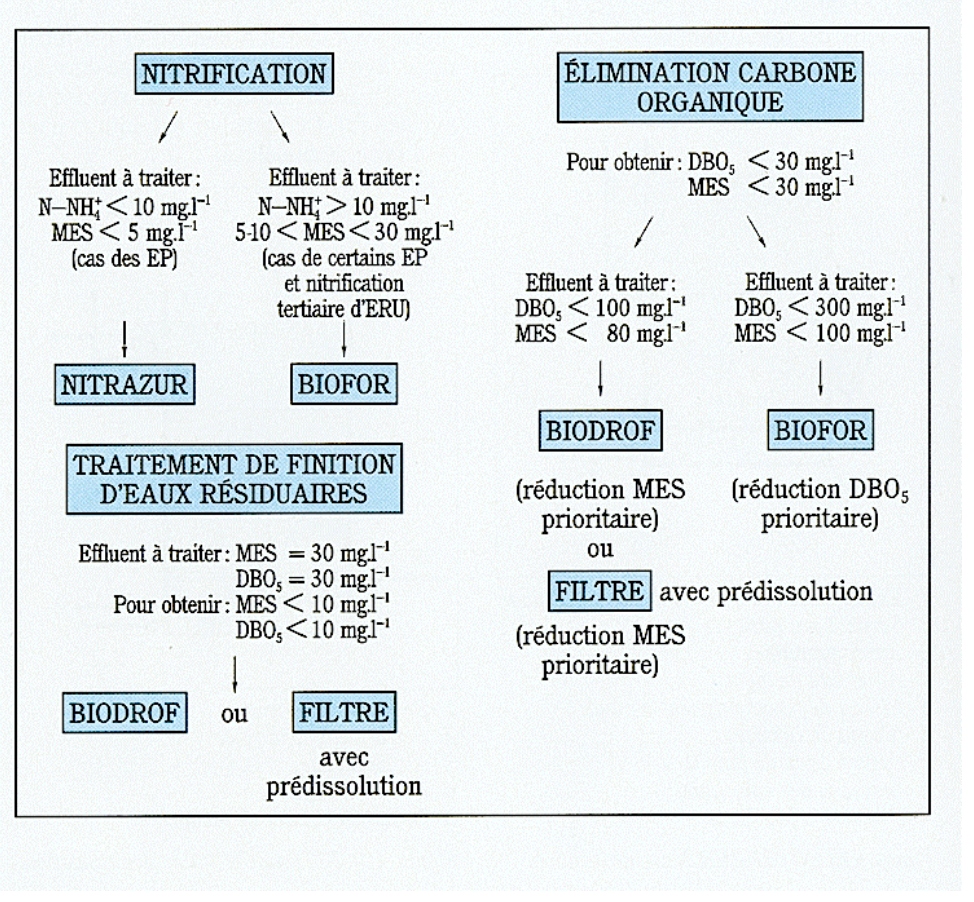
1 - Entrée d'eau à traiter.
2 - Sortie d'eau dénitrifiée.
3 - Air de lavage.
4 - Eau de lavage.
5 - Départ des boues de lavage.

Figure 419. NITRAZUR DN en dénitrification.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.6. Choix d'une technique de traitement en lits granulaires fixes

Le tableau suivant donne les orientations d'utilisation des différents procédés par cultures fixées aérobies en eaux résiduaires.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

12
MÉTHANISATION

Utilisée depuis plus d'un siècle sur les boues des stations d'épuration urbaines, la méthanisation, procédé économe en énergie, a vu son champ d'application progressivement s'étendre aux effluents liquides.

Productrice d'un gaz riche en méthane, elle est néanmoins, avant tout, un traitement de dépollution et doit être conçue pour consommer elle-même le moins d'énergie possible, sans nuire à l'efficacité du procédé: dispositifs de brassage, recirculation et réchauffage.

D'autres avantages du procédé sont une faible production de boues (voir page 318) et une moindre consommation de nutriments.

Le plus souvent, la méthanisation ne permet pas de respecter les normes de rejet au milieu naturel. En particulier, la pollution azotée est peu affectée. Un traitement aérobie de finition est généralement nécessaire. Les techniques mises en oeuvre sont du type continu. Elles comprennent deux familles principales

- les cultures libres,
- les cultures fixées.

		Procédé	**Champ d'application**
Cultures libres	Digesteur unique en mélange intégral	Voir page 938	Boues en excès et lisiers
	Digesteur-décanteur (ou contact anaérobie)	ANALIFT	Eaux résiduaires concentrées
	Digesteur à lit de boue	ANAPULSE	Certaines eaux résiduaires peu concentrées et facilement dégradables
Cultures fixées	Sur support organisé (matériau plastique)	ANAFIZ	Eaux résiduaires peu ou moyennement concentrées
	Sur support mobile	ANAFLUX	et contenant peu de MES

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. DISPOSITIONS GÉNÉRALES

1.1. ACIDIFICATION

Un bassin d'acidification (hydrolyse) est parfois nécessaire en amont du méthaniseur. Il est mis en oeuvre
- dans le cas d'un temps de séjour court dans le réacteur de méthanisation,
- si l'effluent présente des concentrations en sulfates de plusieurs grammes par litre et selon la valeur de la DCO,
- sur certains substrats (ex.: glucose).

Ce bassin peut aussi avoir pour rôle de régulariser le flux polluant. Il est couvert, afin de réduire les introductions d'oxygène, et généralement brassé. Son isolation permet de réduire les pertes thermiques et d'éviter l'apport éventuel de chaleur en tête de l'installation.

Le temps de séjour, selon la nature de l'effluent, peut varier de quelques heures à 48 heures.

L'acidification est normalement réalisée avec des cultures libres, bien qu'en principe, rien ne s'oppose à la mise en oeuvre de cultures fixées.

1.2. CHAUFFAGE

Un bon contrôle de la température est indispensable.

Un dispositif de réchauffage est pratiquement toujours nécessaire, même sur des effluents chauds, ne serait-ce que pour la période de démarrage à faible charge. Des échangeurs extérieurs, de préférence peu sensibles aux matières en suspension, sont à conseiller.

Dans le cas de temps de séjour courts, l'apport calorifique est souvent effectué sur l'effluent entrant. Avec des temps de séjour longs (supérieurs à la semaine), l'apport est plutôt appliqué sur le contenu même du réacteur et des échangeurs à tubes concentriques doivent être utilisés.

Avec des effluents à traiter présentant une forte température, un système de refroidissement peut être nécessaire.

1.3 . pH

Il est nécessaire d'accroître l'alcalinité de la plupart des effluents industriels, afin de maintenir dans le réacteur un pH voisin de 7. Cet apport est effectué sur l'eau brute et, de préférence, sous forme de chaux (cas du procédé par contact anaérobie), ce qui favorise la floculation et la décantation de la boue. Si les quantités à injecter sont importantes, la soude sera préférée dans les autres procédés.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.4. SÉCURITÉS

Le réacteur est équipé des sécurités suivantes:

- sécurité contre les surpressions (soupage de décharge à l'atmosphère),
- sécurité contre les dépressions (par introduction d'air ou d'un gaz inerte au travers d'un casse-vide),
- sécurité contre incendie et explosion (arrête-flamme) sur les circuits gaz,
- sécurité contre les condensations d'eau.

1.5. STOCKAGE DU GAZ

Le gaz produit par la méthanisation d'ERI est généralement utilisé à des fins thermiques dans l'usine ou sur l'installation. Il est stocké dans des gazomètres qui permettent de compenser les fluctuations de production et de faciliter l'alimentation des brûleurs. Ces gazomètres sont souvent constitués d'enveloppes souples installées dans des bâtiments. Une torchère complète l'installation. Dans le cas où le gaz produit ne constitue qu'une faible fraction de la consommation de combustible, le gazomètre peut éventuellement être remplacé par une régulation de pression dans le réacteur.

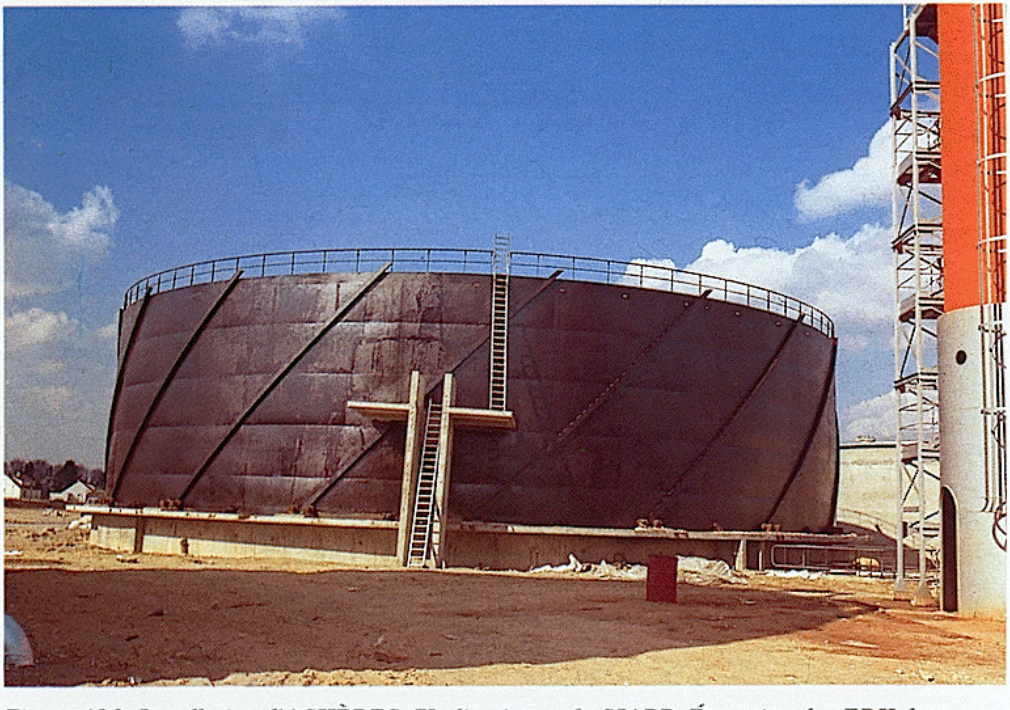


Figure 420. Installation d'ACHÈRES (Yvelines) pour le SIAPP. Épuration des ERU de l'agglomération parisienne. Gazomètre. Capacité : 10 000 m³.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. CULTURES LIBRES

La méthanisation des boues, applicable aux lisiers, est traitée au chapitre 18, page 932.

2.1. ANALIFT

(Digesteur brassé + décanteur)

Ce procédé, appelé aussi **contact anaérobie,** comprend un réacteur brassé et un décanteur séparé, avec un dispositif réglable de recirculation des boues, permettant de maintenir une concentration en boues aussi élevée que possible dans le réacteur (figure 421).

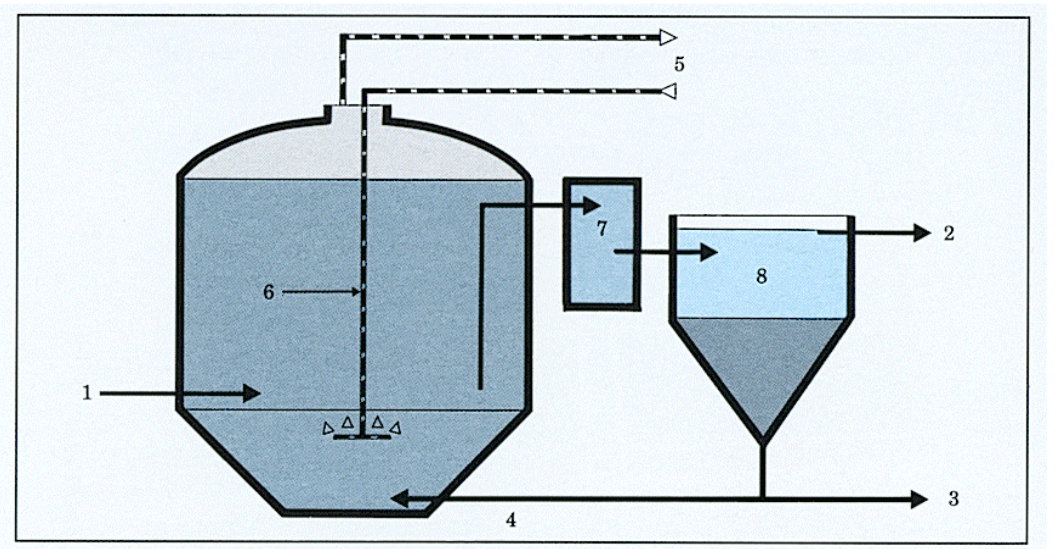
Entre les deux appareils principaux, il est nécessaire d'implanter un dispositif de dégazage, de façon à éliminer les gaz occlus dans les flots, dont ils freinent la décantation.

2.1.1. Conception

- **Réacteur**

Le brassage a pour but d'assurer l'homogénéité du milieu réactionnel, de façon à atténuer les effets des variations de charge. Il est, de préférence, assuré par une injection de gaz au moyen de cannes en matériau inoxydable (voir page 936). Cette technique de brassage s'avère la plus efficace et la plus facile à exploiter. L'absence d'organe mécanique en mouvement à l'intérieur du réacteur est gage de sécurité et de fiabilité.

Le réacteur peut être réalisé en béton, en acier ou en matériau plastique. Une protection intérieure anticorrosion est souvent nécessaire. L'isolation doit être



1-Eau brute. *4-Recirculation des boues.* *7-Dégazage.*
2-Eau traitée. *5-Gaz.* *8-Décantation.*
3 -Boues en excès. *6 -Brassage au gaz.*

Figure 421. Procédé "contact anaérobie" (ANALIFT).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

parfaitement réalisées, afin de maintenir en permanence dans le milieu, la température souhaitée. Certaines conditions climatiques particulièrement favorables peuvent permettrent de se libérer de cette sujétion.

- **Dégazage**

Le mélange boueux issu du réacteur transite par un bassin de dégazage dont le rôle est triple

- tranquillisation éventuelle,
-dégazage de la liqueur,
- floculation de la boue.

Les temps de séjour dans cet ouvrage ne doivent pas être inférieurs à 30 minutes. Différentes techniques de dégazage sont envisageables. La disposition des ouvrages et les nécessités de couverture peuvent favoriser la mise en oeuvre d'un dégazage sous vide. L'agitation lente est souvent utilisée.

- **Décanteur**

Le décanteur est conçu comme un épaississeur, car les boues extraites sont à des concentrations élevées. Il est dimensionné en fonction du flux massique, ce qui entraîne des vitesses ascensionnelles de 0,05 à 0,2 $m.h^{-1}$.

Les taux de recirculation des boues adoptées sont généralement compris entre 50 et 150 %.

2.1.2. Applications et performances

Ce procédé, peu sensible aux variations de charge, est adapté aux effluents concentrés (distilleries, conserveries, industries chimiques, pâtes à papier) et aux effluents dilués présentant des risques de précipitation minérale (sucrerie de betteraves).

La séparation des fonctions méthanisation et décantation permet d'agir sur chaque ouvrage indépendamment, par exemple dans les cas suivants:

- transfert des boues d'un ouvrage sur l'autre, facilitant les opérations d'entretien et de redémarrage,
- strippage de H_2S (produit par la réduction des sulfates et risquant d'inhiber le pro

Figure 422. Installation de PLATTING (RFA) pour la sucrerie ZUDZÜCKER. Capacité: 30 à 38 t DCO par jour. Méthanisation des effluents avec réacteur ANALIFT.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

cessus) et traitement du gaz à l'extérieur,
- évacuation de la fraction minérale des boues après centrifugation.

Les charges appliquées en DCO dépendent de la nature des effluents et des ren

dements souhaités. Elles peuvent varier de 3 à 15 kg/m^3.j.

Les rendements d'élimination de la DCO varient de 65 % (cas de la distillerie de mélasse) à plus de 90 % (sucrerie de betteraves) et ceux de la DBO_5 de 80 à 95%

.

2.2. ANAPULSE (Digesteur à lit de boue)

Ce procédé est adapté aux effluents conduisant à la formation de boues "granuleuses", (voir page 318

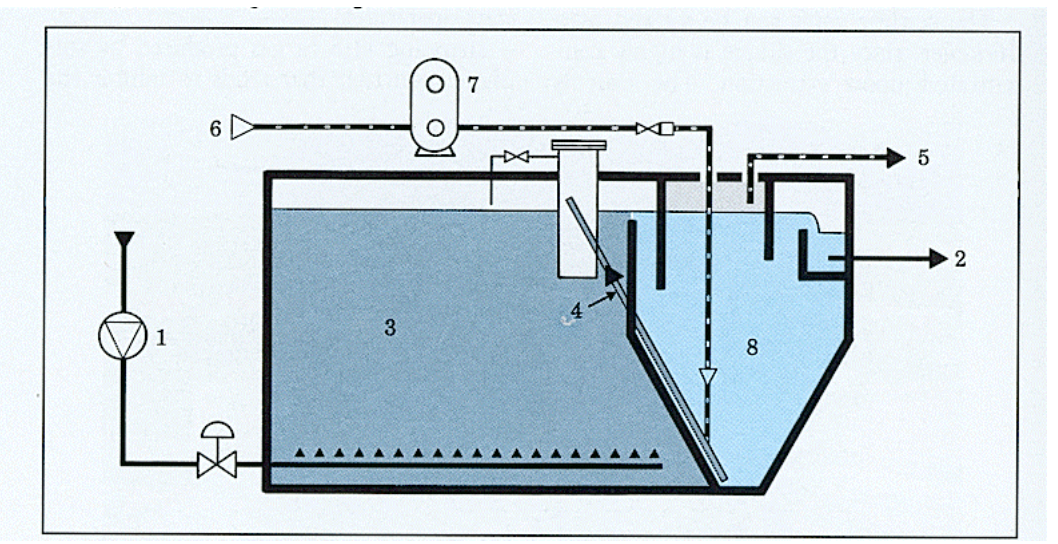
2.2.1. Conception

- **Réacteur**

Dans ce type de réacteur, à **flux ascendant, l'effluent** traverse un lit de boues. Il passe ensuite dans un décanteur situé dans la même enceinte, afin d'être débarrassé des matières en suspension qui s'échappent du lit de boues. L'homogénéisation du lit est obtenue par la production de gaz au sein de la boue.

L'alimentation est pulsée, ce qui assure une équirépartition de l'eau sur toute la surface du réacteur. Cette disposition permet l'emploi de tuyauteries d'alimentation de gros diamètre et réduit les risques de bouchage.

Le réacteur peut être réalisé en béton ou en acier protégé. Il est isolé thermiquement



1- Pompe d'alimentation en eau brute
2- Eau traitée
3- Réacteur
4- Recirculation des boues
5- Vers gazomètre
6- Gaz
7- Surpresseur de gaz
8- Décanteur

Figure 423. Procédé à lit de boues avec alimentation pulsée (ANAPULSE).

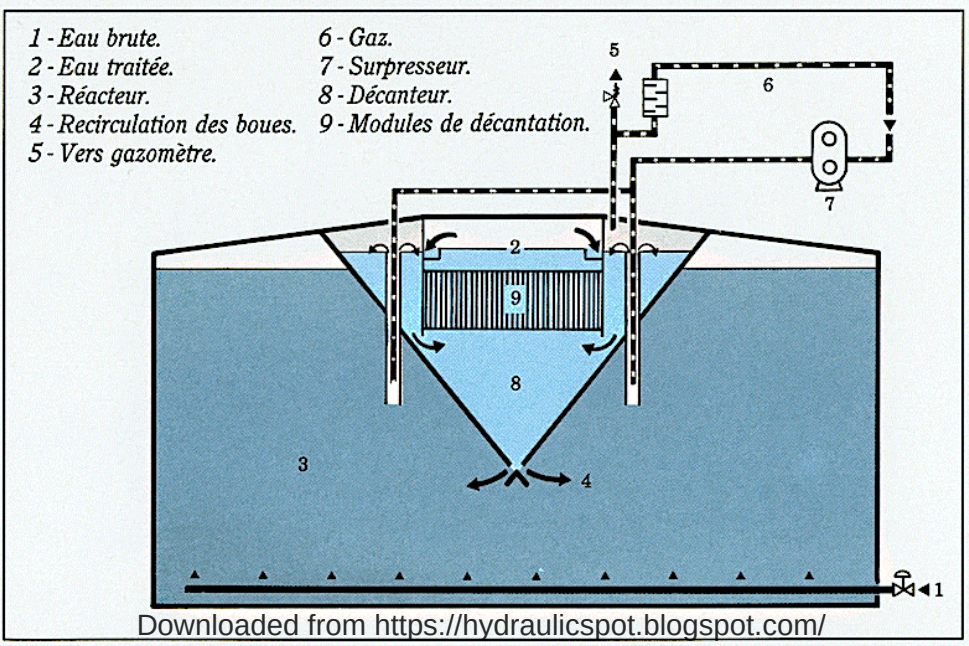
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Décanteur**

Le lit de boue assure normalement un effet filtrant Les matières en suspension résiduelles sont retenues dans le décanteur.

Deux dispositions sont possibles
- décanteur accolé, libérant une grande surface de dégazage et permettant la construction d'ouvrages de hauteur limitée (figure 423),

Figure 424. Installation dARMENTIÈRES (Nord) pour la Brasserie SÉBASTIEN ARTOIS Capacité 50 t DCO par jour. Réacteur ANAPULSE pour la méthanisation des effluents.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 425. Réacteur à lit de boues avec décanteur superposé.

- décanteur superposé, déconseillé pour les effluents dilués (figure 425).

Dans les deux cas, des pompes à émulsion de gaz permettent de maîtriser le recyclage des boues décantées. Le décanteur ne comporte aucun organe mécanique mobile.

2.2.2. Applications et performances

Ce procédé peut être appliqué aux effluents dilués et facilement dégradables de l'industrie agro-alimentaire (brasserie, amidonnerie, etc.). Il n'est généralement pas adapté aux effluents concentrés et/ou contenant des MES décantables (exemples: argile, carbonate de calcium).

Les charges de DCO appliquées peuvent varier de 6 à 15 kg/m^3.j suivant la nature de l'effluent. Compte tenu des temps de séjour, une acidification préalable est souvent nécessaire.

L'application de cette technique a été envisagée en prétraitement d'ERU en pays chauds.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. CULTURES FIXÉES

3.1. ANAFIZ

(Cultures fixées sur support organisé)

Dans ce procédé, le filin bactérien se développe sur un support fixe, en matériau plastique, traversé par l'eau en flux ascendant.

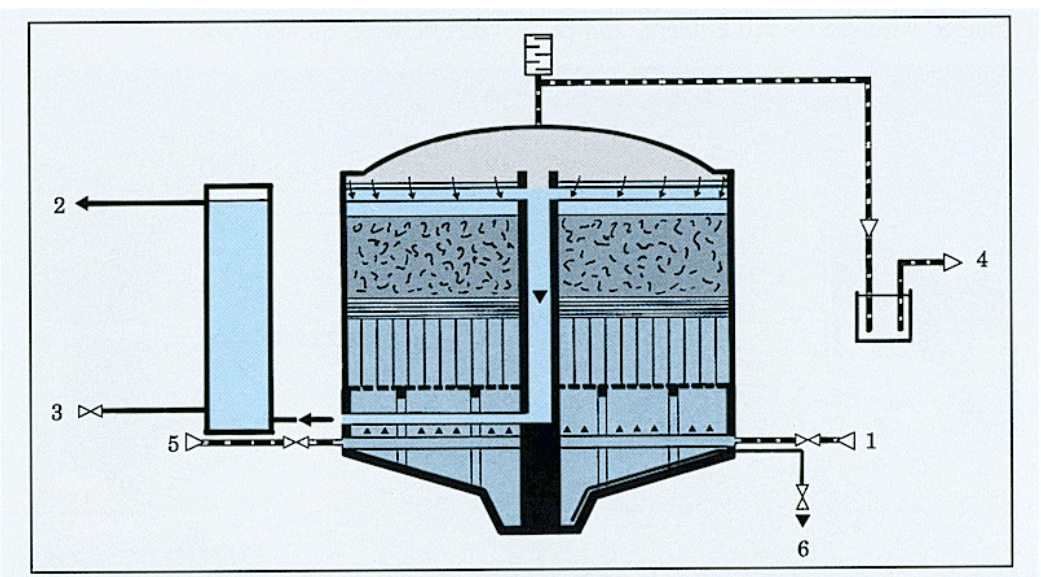
3.1.1. Conception

Dans le réacteur (figure 426) alimenté de bas en haut, l'eau et le gaz circulent à co-courant. Afin d'assurer une bonne répartition de l'effluent sur toute la section de l'appareil, et d'éliminer par là les risques de cheminements préférentiels, une vitesse ascensionnelle suffisante doit être maintenue, ce qui impose souvent un recyclage d'eau traitée.

Les dispositifs d'alimentation et de reprise de l'effluent traité en partie supérieure, sont également conçus pour assurer la pleine utilisation de la masse de contact.

En règle générale, cette dernière comporte deux couches traversées successivement par l'effluent

- en partie inférieure, un **matériau ordonné,** plutôt lent à coloniser mais peu sensible au colmatage. On y observe souvent une colonisation double comportant, d'une part la flore fixée et, d'autre part, un lit de boues qui augmente la quantité de biomasse disponible. Les MES de l'effluent peuvent y subir une hydrolyse,



1-Eau brute. *3-Recyclage éventuel.* *5-Gaz.*
2 -Eau traitée. *4 - Vers gazomètre.* *6 -Purges.*

Figure 426. Réacteur à cultures fixées sur support organisé (ANAFIZ).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- en partie supérieure, un **matériau en vrac,** de surface spécifique élevée, permet une colonisation rapide et offre de bonnes conditions réactionnelles pour la méthanogénèse, qui est, dans le procédé, la réaction demandant le contact le plus intime entre le substrat et la biomasse active. Le risque de colmatage de ce type de matériau est fortement atténué par le fait que l'effluent a d'abord traversé la zone inférieure d'hydrolyse, et qu'il est déjà en phase de méthanogénèse, faible productrice de biomasse en excès.

Lorsque l'effluent a subi au préalable une acidification complète (cas fréquent en sucrerie), le matériau ordonné peut être supprimé. On peut aussi le remplacer par du matériau en vrac, si l'effluent ne contient pas de matières en sus
pension.

La boue en excès est, en majorité, évacuée en continu par l'effluent traité, avec possibilité de mise périodique en turbulence du matériau par injection de gaz.

Selon la qualité d'effluent souhaitée, une clarification complémentaire peut être nécessaire.

Périodiquement, on procède en outre à une évacuation de boues à partir de la zone inférieure du réacteur.

Le réacteur peut être réalisé en béton, acier protégé ou plastique, avec isolation thermique.

3.1.2. Applications et performances

Le procédé ANAFIZ est adapté aux effluents relativement dilués de l'industrie agro-alimentaire: laiterie, distillerie, sucrerie (s'il n'y a pas d'utilisation de chaux dans le circuit), confiserie, etc.

Suivant la nature de l'effluent, la charge de DCO appliquée peut varier entre 8 et 15 $kg/m^3.j$ avec des rendements d'élimination de DCO compris entre 70 et 80 %, et de DBO_5 entre 80 et 90 %.

Downloaded from https://hydrauliqsnot.blogspot.com/

Figure 427. Installation d'AHAUSEN (RFA) pour DAA. Capacité: 12 t DCO par jour. Méthanisation d'effluents de distillerie avec réacteur ANAFIZ

3.2. ANAFLUX (Cultures fixées sur lit fluidisé)

Dans ce réacteur (figure 428), les bactéries sont figées sur un matériau granulaire mis en expansion par le courant ascendant du liquide à traiter, en sorte que le contact substrat culture est amélioré et la surface d'accrochage du film par unité de volume est maximale.

Ce type de réacteur est celui qui permet de concentrer les plus fortes populations bactériennes actives et donc d'accepter les charges volumiques les plus élevées.

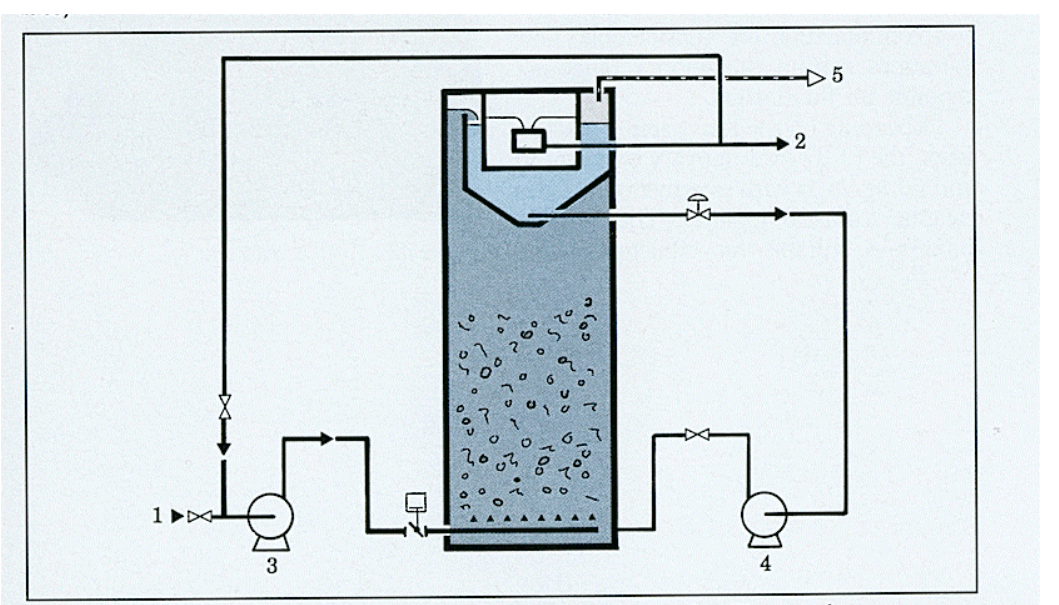
Une BIOLITE spéciale, de TEN inférieure à 0,5 mm, a été choisie par suite de ses caractéristiques propres :

- structure poreuse à très forte surface spécifique,
- fable masse volumique,
- résistance à l'attrition,
- conditions de fabrication strictement contrôlées.

3.2.1. Conception

Le réacteur peut être réalisé soit en acier, soit en matériau plastique. Protection anticorrosion et isolation thermique soue souvent nécessaires.

Pour assurer la fluidisation du matériau, il faut maintenir une vitesse de 5 à 10 $m.h^{-1}$ imposant généralement un recyclage de l'effluent. Le mélange est introduit dans le réacteur; un séparateur triphasique permet de récupérer la BIOLITE qui pourrait être entraînée, et de la recycler par l'intermédiaire d'une pompe. La colonisation progressive du matériau peut provoquer un allègement excessif par recyclage de celui-ci et son entraînement hors du système. Le décrochage des



1 - Eau brute. 3 - Pompe de fluidisation. 5 - Sortie du gaz.
2 - Eau traitée. 4 - Recirculation de BIOLITE.
Figure 428. Réacteur à cultures fixées sur lit fluidisé (ANAFLUX).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

boues en excès d'une partie du matériau au travers d'une enceinte, où règne une forte turbulence, permet l'évacuation de la biomasse excédentaire avec l'eau traitée. Si l'on souhaite éliminer les matières en suspension, une clarification complémentaire peut être nécessaire.

3.2.2. Applications et performances

Les fortes charges volumiques appliquées entraînent des temps de séjour relativement courts dans le réacteur, ce qui nécessite, dans la majorité des cas, une acidification préalable.

Les principaux avantages du procédé sont:

- pas de risque de colmatage du matériau support,
- rapidité de démarrage,
- faible encombrement,
- pas de risque de lessivage de la biomasse,
- grande variation de débit possible, dans la limite de la vitesse de fluidisation.

Selon la nature de l'effluent, la charge de DCO appliquée peut varier de 30 à 60 $kg/m^3.j$ et le rendement d'épuration, de 70 à 90 %. L'ANAFLUX est adapté à des effluents dont la DCO est de l'ordre ou supérieure à 2,5 $g.1^{-1}$, c'est-à-dire à des effluents des IAA (brasseries, sucreries, conserveries, amidonneries, distilleries, laiteries, etc.), d'industries du papier (papeteries, condensats d'évaporation, etc.) et d'industries chimique ou pharmaceutique.

Figure 429. Pilote ANAFLUX.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. DÉMARRAGE ET CONTRÔLE DES INSTALLATIONS

4.1. DÉMARRAGE ET ENSEMENCEMENT

Au démarrage des installations, un ensemencement est toujours nécessaire sauf pour les boues d'ERU et les lisiers.

Des précautions particulières doivent être prises avec les effluents de (industrie chimique, de la pâte à papier, etc., et, en règle générale, lorsque l'ensemencement naturel de l'effluent aura été contrarié (alcalinisation, montée en température importante, forte salinité). La quantité de boues d'ensemencement doit être la plus importante possible, afin de réduire le temps de démarrage.

Au début, la charge volumique doit être limitée et les pertes de boues sont relativement importantes (acclimatation); comme la synthèse des micro-organismes est faible (0,1 à 0,2 kg MV par kg de $DB0_5$ éliminé), le choix de l'ensemencement est très important.

Un contrôle de l'activité de la boue d'ensemencement est nécessaire, ainsi que le choix du point de prélèvement Pour limiter les volumes transportés, il est possible d'épaissir les boues (sauf pour les cultures fixées) par centrifugation ou filtration (GDE, SUPERPRESS-DEG). Ces opérations doivent être contrôlées (durée du stockage, dose de polymère, etc.).

Après une période de réactivation de ANAFLUX quelques jours (stabilisation de la température), la charge de DCO appliquée doit être environ de 0,1 kg/kg MV.j, elle est ensuite augmentée progressivement, afin de maintenir le rapport AGV/TAC inférieur à 0,2 et le pH voisin de 7.

On peut espérer doubler la charge tous les 10 à 20 jours, selon la nature des effluents et le procédé utilisé.

- **Nature de la boue d'ensemencement**

On peut utiliser
- boues acclimatées,
- boues digérées d'ERU,
- déchets d'élevage (bovins, porcs).

Les paramètres de contrôle de la boue d'ensemencement choisie sont
- kg DCO éliminée par kg de MV et par jour,
- m^3 de gaz par m^3 de réacteur et par jour,
- pH et température de fonctionnement,
- % MV.

- **Quantité nécessaire de boues**

ANALIFT	de 3 à 5 kg de MV par m^3 de réacteur,
ANAPULSE	30 % du volume du réacteur en boues granuleuses (démarrage en quelques mois) ou 10 à 20 % du volume (démarrage très long),
ANAFIZ	3 kg de MV par m^3 de réacteur,
ANAFLUX	< 10 % du volume du réacteur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2 PARAMÈTRES D'EXPLOITATION

En exploitation normale, il est nécessaire de surveiller les paramètres suivants

- température: généralement 3 5 °C ± 2 °C
- AGV : normalement, < 500 $mg.l^{-1}$
- $\frac{AGV}{TAC} < 0.2$
- pH≅7
- production de gaz: environ 0,4 ± 0,05 m^3 par kg de DCO éliminée
- % CO_2 dans le gaz, qui doit rester constant

En cas de dysfonctionnement, il est, le plus souvent, nécessaire de réduire la charge; les paramètres précédents doivent être suivis plus fréquemment et les déficiences éventuelles (nutriments, oligo-éléments, toxiques) recherchées

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

13
LES FILTRES

Les modalités très diverses de mise en œuvre des matériaux filtrants granulaires ou des précouches conduisent à la création d'un grand nombre de filtres dont les principales familles sont :

. pour les **matériaux granulaires,** selon les conditions hydrauliques d'utilisation :

- filtres sous pression,
- filtres ouverts, en béton ou métalliques,
- filtres particuliers.

. pour les **filtres à précouche,** selon le support :

- filtres à bougies,
- filtres à cadres.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. ÉQUIPEMENT DES FILTRES A MATERIAU GRANULAIRE

Des considérations techniques communes aux différents types de filtres à matériau granulaire doivent préalablement être rappelées, qui concernent - les conditions de service, - les dispositions internes de lavage.

1.1. CONDITIONS DE SERVICE

. **Cycles**

La presque totalité des filtres à matériau granulaire fonctionne par cycles comportant un lavage final.

Le paramètre essentiel limitant la durée de ces cycles est la perte de charge mais, en-deçà d'une perte de charge maximale acceptable, d'autres paramètres peuvent être préférés qui sont

- le volume filtré ou le temps (par exemple: 8h, 24h, 48h),
- la turbidité, contrôlable par un capteur turbidimétrique.

La perte de charge maximale est déterminée par

- la charge hydraulique disponible (hauteur d'alimentation gravitaire ou courbe des pompes, elles-mêmes choisies en fonction de la consommation d'énergie acceptable),
- le maintien de la qualité de l'eau filtrée, tout au long du cycle, avec une importance variable des MES selon la destination de l'eau. Il est essentiel en filtration d'eau d'appoint ou d'eau potable. Sur certaines eaux industrielles, cette condition peut ne pas être imposée et des filtres sous pression peuvent être utilisés avec des pertes de charge élevées (0,5 à 1,5 bar); seule importe alors la qualité moyenne de l'eau.

. **Remise en service**

Dans une batterie filtrante, à la remise en service d'un filtre lavé, il faut éviter le surdébit du filtre qui vient d'être lavé. Le risque est d'autant plus important que le nombre de filtres est faible; une équirépartition assure la meilleure qualité d'eau filtrée.

Dans certains cas, il est opportun de mettre à l'égout les premières eaux filtrées trop chargées (filtrations très rapides, eaux préalablement non clarifiées, etc.).

1.2. SUPPORTAGE DU MATÉRIAU

La taille effective du matériau pouvant, en pratique, varier de 0,35 mm (grenat) à 2 mm (sable) ou 5 mm (anthracite), celui-ci peut être supporté:

- soit par un plancher garni de buselures percées de fentes d'une largeur très inférieure à la taille du matériau,
- soit par une couche-support (gravier, grenat ...) en particulier si les dimensions du matériau filtrant et les fentes des buselures ne sont pas compatibles. Cette

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

couche-support, d'une hauteur de 5 à 40 cm, peut être constituée de 2 à 4 sous-couches de granulométries intermédiaires selon le matériau et le système de répartition (ramifications ou buselures).

1.3. LAVAGE DES FILTRES A MATÉRIAU DENSE

Il est toujours assuré en flux ascendant à l'aide d'un ou de deux fluides (voir page 192).

1.3.1. Répartition des fluides de lavage

Sous la masse filtrante doit donc être prévu un système répartissant l'un de ces fluides ou les deux, l'air requérant des exigences particulières. Deux familles de dispositifs sont envisageables

- simples collecteurs de retour d'eau seule,
- dispositifs à matelas d'air réalisés sous des planchers ou dans des collecteurs spéciaux.

1.3.1.1. Dispositifs pour retour d'eau seule

Ils peuvent être constitués par des ramifications tubulaires raccordées sur une boite centrale, ou un collecteur transversal de distribution. Les ramifications comportent des orifices ou des buselures assurant la répartition de l'eau.

1.3.1.2. Dispositifs à matelas d'air

Le maintien d'un matelas d'air, nécessaire à la répartition de ce fluide, est obtenu grâce à l'emploi de buselures à queue. La figure 430 représente la coupe fane buselure à longue queue, fixée sur un plancher béton, pendant la période de lavage à l'eau et à l'air.

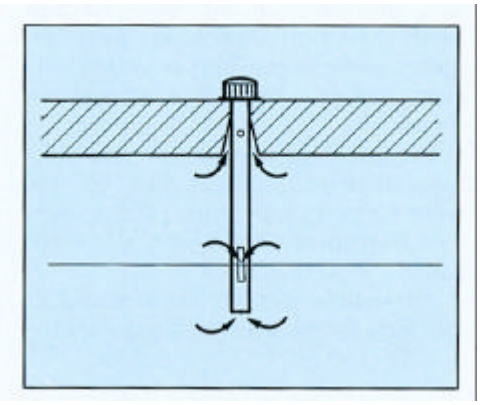


Figure 430. Buselure en période de lavage de filtre à l'air et à l'eau.

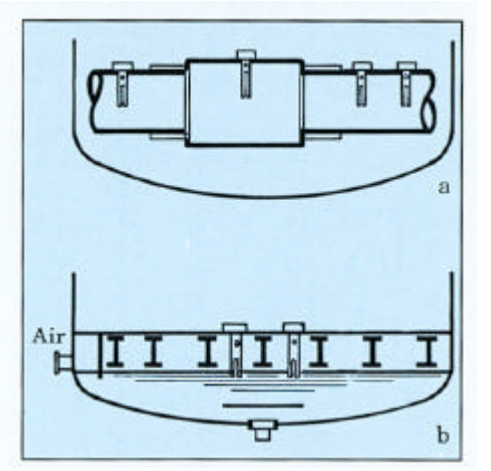


Figure 431. Dispositifs à matelas d'air pour filtres métalliques.
a) par collecteur - b) sous plancher.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Cette buselure comporte une tête à fentes fines s'opposant au passage du matériau filtrant et une queue constituée par un tube comportant un trou à sa partie supérieure ainsi qu'une fente à sa partie inférieure.

L'air injecté sous le plancher forme un matelas qui, une fois constitué, vient alimenter le trou et les fentes des buselures en assurant un mélange air et eau qui se trouve ainsi réparti sur toute la surface du filtre. Ce système de lavage, particulièrement efficace, permet une économie d'eau.

Pour éviter la formation de "mu-balls", il faut prévoir de l'ordre de 55 buselures par m2 de plancher, avec un débit de contre-courant d'air de l'ordre de 1 m3.1-1 par buselure.

Le lavage à matelas d'air est ainsi réalisé sur les filtres métalliques de deux façons (figure 431).

Figure 433 a.
Buselure D 50
Métallique
à longue queue.

Figure 433 b.
Buselure D 25 en matière
plastique avec bague
de fixation sur
plancher métallique.

Figure 433. Buselures DEGRÉMONT pour lavage air et eau (D 50 et D 25).

1.3.1.3. Buselures

Suivant les techniques de lavage, deux types de buselures peuvent être employés :

- buselures pour lavage à l'eau seule (figures 432 a et 432 b). Elles se différencient par leur forme, la largeur de leur fente et la nature de leur matière.

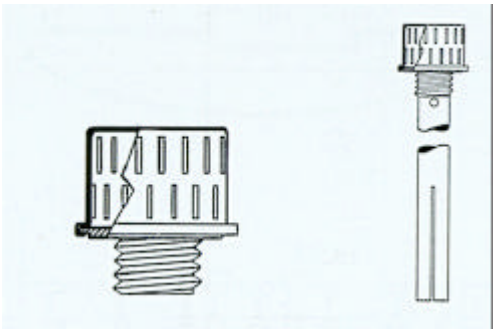


Figure 432 a.
Buselure D 50
métallique.

Figure 432 b.
Buselure D 15
en matière
plastique.

Figure 432. Buselures DEGRÉMONT pour lavage à l'eau seule.

Figure 433 c.
Buselure D 22 en matière
plastique avec bague
de scellement pour
plancher béton.

Figure 433 d.
Buselure D 28 en
matière plastique
pour plancher métal-
tique à trou fileté.

Figure 434. Buselures DEGRÉMONT pour lavage air et eau (D 22 et D 28).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- buselures pour lavage à l'eau et à l'air la répartition de l'air s'effectue par matelas d'air et les buselures à queue (figures 433 et 434), spécialement conçues à cet usage, permettant d'obtenir une parfaite équirépartition de l'air et de l'eau.

L'expérience de DEGRÉMONT a permis de développer différents types de buselures, optimisées suivant les techniques de filtration, et à partir de matériaux résistants à des milieux agressifs variés.

1.3.2. Consommations d'eau de lavage par rapport au volume filtré

Elles sont très dépendantes de la concentration en MES et de leur nature. On peut toutefois, en filtration d'eau clarifiée, donner des ordres de grandeur comparatifs

- 1 à 2 % en lavage "air et eau" de filtres monocouches (AQUAZUR),
- 3 à 5 % en lavage "air puis eau" de filtres bicouches (MEDIAZUR).

1.4. LES DIFFÉRENTES FAMILLES DE FILTRES DEGRÉMONT

Type de lavage	**Filtres ouverts**	**Filtres sous pression**	**Filtres particuliers**
Filtres à lavage eau seule **Couche uniforme sable ou anthracite**		FC HYDRAZUR	Autolaveur
Filtres à lavage air et eau **(couche uniforme sable)**	FV1 AQUAZUR T, V,	FV2 FH FP FEC M	COLEXER
Filtres à lavage air puis eau séparément **Bicouche (sable/anthracite)** **ou monocouche Biolite**	MÉDIAZUR T, V, BV G, B, GH	MÉDIAZUR FECB FPB	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. LES FILTRES SOUS PRESSION

Ces filtres sont construits avec des revêtements adaptés aux conditions d'utilisation. Les dispositifs d'évacuation des eaux de lavage doivent être particulièrement soignés, de façon à en assurer une collecte uniforme.

Ils se prêtent aisément à un fonctionnement entièrement automatique. DEGRÉMONT a réalisé des unités jusqu'au diamètre de 8 m.

2.1. FILTRES LAVABLES A L'EAU SEULE

Ces filtres sont, la plupart du temps, chargés d'une couche filtrante unique, sable ou anthracite. La perte de charge maximale atteinte en fin de cycle peut varier de 0,2 à 2 bars, essentiellement en fonction de la finesse de la couche filtrante et de la vitesse de filtration.

Le lavage est assuré exclusivement par retour d'eau dont la vitesse doit être adaptée à la granulométrie du matériau. Elle est donnée, pour le sable et une température de 15 à 25 °C, parle tableau suivant

Taille effective mm	0,35	0,55	0,75	0,95
Vitesse ($m.h^{-1}$)	25 à 35	40 à 50	55 à 70	70 à 90

Le contrôle de la vitesse de lavage, qui est essentiel, peut se faire aisément en équipant le puisard des boues d'un seuil de jaugeage. On peut en même temps observer l'évolution de la qualité de l'eau évacuée et régler ainsi la durée du lavage. Celle-ci varie entre 5 et 8 min, suivant les hauteurs de sable et les matières retenues.

. **Réalisations possibles**

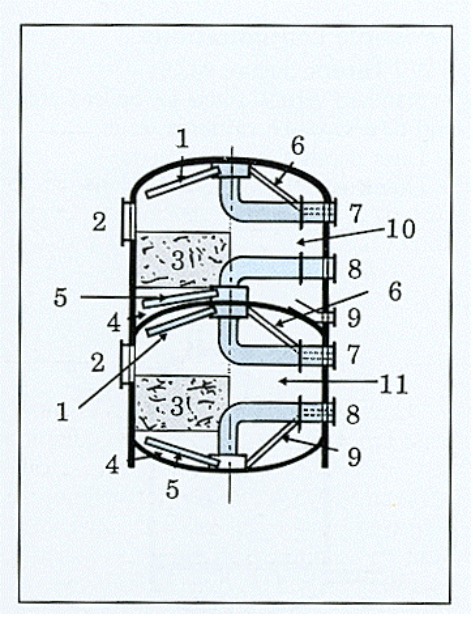
Filtre HYDRAZUR en acier revêtu, pour grandes vitesses de filtration, et qui peut être réalisé en colonne double (figure 435).

- hauteur de couche de 0,6 m,
- diamètres de 1,4 à 3 m,
- application aux eaux de piscines.

Filtres F.C. (figure 436)

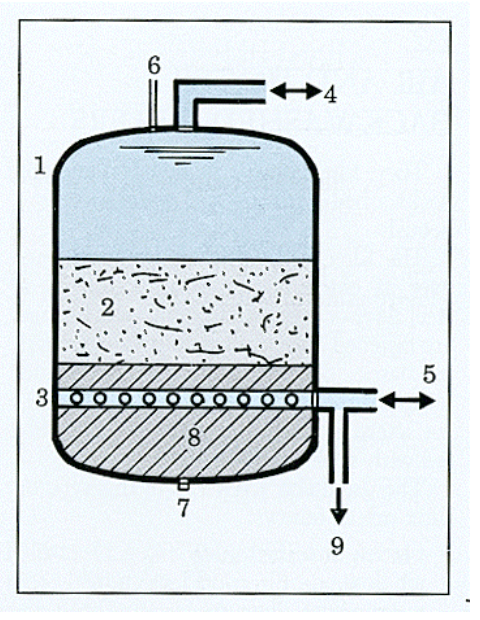
- hauteur de couche filtrante de 0,6 m,
- diamètres de 0,65 à 3 m,
- application aux neutralisations, filtrations sur charbon actif ou anthracite.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Collecteur supérieur.
2 - Tampon d'accès.
3 - Couche filtrante.
4 - Couche support.
5 - Collecteur inférieur.
6 - Purge d'air.
7 - Entrée d'eau brute.
Sortie d'eau de lavage.
8 - Entrée d'eau de lavage.
Sortie d'eau filtrée.
9 - Vidange.
10 - Filtre supérieur.
11 - Filtre inférieur.

Figure 435. Colonne double HYDRAZUR.



1 - Corps du filtre.
2 - Matériau filtrant.
3 - Collecteur.
4 - Entrée d'eau brute. Sortie d'eau de lavage.
5 - Sortie d'eau filtrée. Entrée d'eau de lavage.
6 - Purge d'air.
7 - Vidange.
8 - Couche support.
9 - "Rewash" éventuel.

Figure 436. Filtre fermé sous pression à lavage par retour d'eau.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.
FILTRES LAVABLES PAR AIR ET EAU

Ce sont des filtres à couche unique homogène, lavés par air et eau simultanément

Le lit filtrant, homogène sur toute sa hauteur, est supporté par un plancher métallique ou un collecteur, sur lequel sont fixées des bagues où viennent se visser des buselures, métalliques ou plastiques, suivant la nature et la température du liquide à filtrer. Ces filtres sont en général chargés de sable.

Les caractéristiques habituelles de ce type de filtre sont les suivantes

- granulométrie (TE) . . . 0,7 à 1,35 mm
- débit d'air . . . . . 55 $m^3/h.m^2$
- débit d'eau pendant le soufflage ……..5 à 7 $m^3/h.m^2$
- débit d'eau de rinçage. 15 à 25 $m^3/h.m^2$
- perte de charge en fin de cycle . . . . . 0,2 à 1,5 bar

La hauteur de couche est essentiellement adaptée à la vitesse de filtration et à (importance de la charge de matière à retenir. Les vitesses de filtration sont habituellement de 4 à 20 $m.h^{-1}$. Dans l'industrie, on peut utiliser ce filtre avec des hauteurs de couche de 1 à 2 m et des granulométries de sable comprises entre 0,65 et 2 mm. Les vitesses peuvent atteindre :

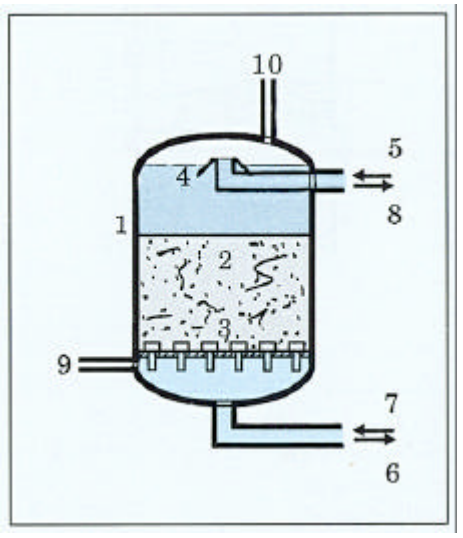
- 20 à 40 $m.h^{-1}$ pour la filtration grossière sous pression d'eaux chargées d'oxydes,
- 30 à 50 $m.h^{-1}$ pour la filtration fine d'eaux de mer profondes.

Ces filtres, qui se prêtent très bien à (utilisation de batteries d'unités de grand diamètre, présentent de grands avantages: simplicité de manoeuvre ; sécurité totale de fonctionnement; faible débit instantané d'eau de lavage, dont la consommation est réduite.

. **Réalisations possibles**

Filtres FV2 (figure 437)

- Filtres verticaux standards pour eaux de chaudières et de fabrication, eaux potables, etc.
- Hauteur de couche de l'ordre du mètre.
- Diamètres de 0,95 à 3,2 m.



1 - Corps du filtre.
2 -Matériau filtrant.
3 - Plancher avec buselures.
4 - Vasque d'alimentation.
5 - Entrée d'eau brute.
6 - Sortie d'eau filtrée.
7 - Entrée d'eau de lavage.
8 - Sortie d'eau de lavage.
9 - Entrée d'air de lavage.
10 - Purge d'air.

Figure 437. Filtre FV 2.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Filtres FP

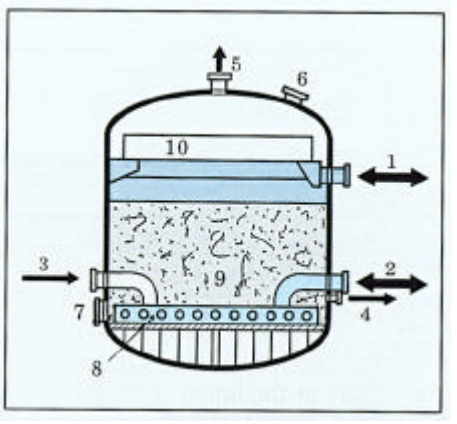
- Filtres verticaux à grande hauteur cylindrique (figure 438).
- Hauteur de couche de 1,8 à 2 m. - Diamètres de 2,5 à 6 m.
- Applications particulières: sidérurgie, eaux résiduaires, déferrisation biologique.

Filtres FECM

- Filtres verticaux compacts, à grande vitesse et pour eaux corrosives (figure 439).
- Hauteur de couche de l'ordre du mètre. - Diamètres de 1,6 à 3,5 m.
- Applications: saumures, eaux de mer en injection.

Filtres FH

- Filtres horizontaux à 1 ou 2 goulottes avec dispositif spécifique de collecte des eaux de lavage (figure 440).
- Hauteur de couche de l'ordre du mètre. - Diamètres de 2;5 à 3,4 m, longueur jusqu'à 12 m.
- Applications: filtration de grands débits d'eaux industrielles (décarbonatation, laminoirs, eau de mer).

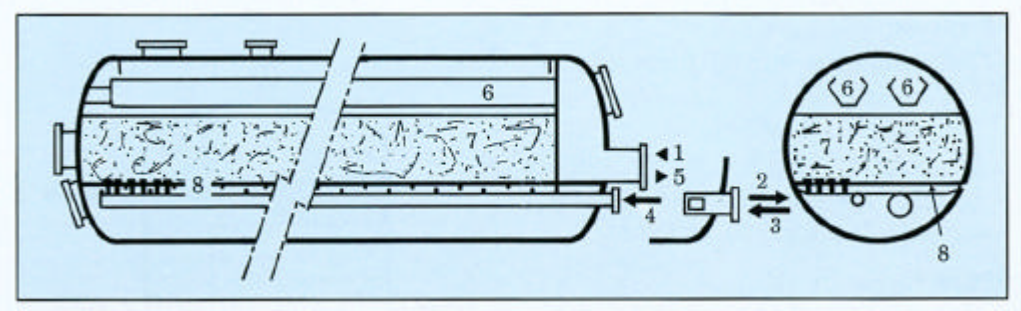


1 - Entrée d'eau brute (sortie d'eau de lavage).
2 - Sortie d'eau filtrée (entrée d'eau de lavage).
3 - Entrée d'air.
4 - Vidange.
5 - Évent.
6 - Trou de main.
7 - Trou d'homme.
8 - Buselures sur ramifications et collecteur.
9 - Matériau filtrant.
10 - Goulotte de reprise des eaux de lavage.

Figure 439. Filtre FECM.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 438. Skid de filtration d'eau de mer pour injection. SHELL à FULMAR (Mer du Nord). Débit 1400 $m^3.h^{-1}$.



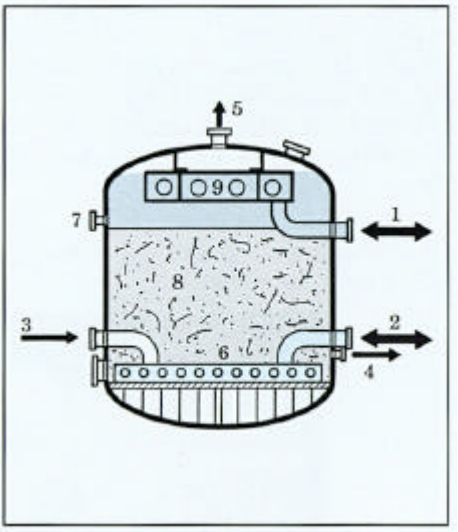
1 - Entrée d'eau brute.
2 -Sortie d'eau filtrée.
3 -Entrée d'eau de lavage.
4 -Air de lavage.
5 - Effluent de lavage.
6 - Goulottes de collecte d'effluent de lavage.
7 - Matériau filtrant.
8 -Plancher avec buselures.
Figure 440. Filtre FH à deux goulottes.

2.3. FILTRES LAVABLES SUCCESSIVEMENT A L'AIR ET A L'EAU

Les filtres précédents peuvent également être chargés d'une couche de matériau léger (anthracite, charbon actif, BIOLITE) ou de deux couches de matériaux différents (filtres bicouches). Leur lavage impose deux phases successives (voir page 194).

Avant d'effectuer le soufflage, il est nécessaire d'abaisser le niveau d'eau.

Lorsque le matériau fin de la double couche est constitué de sable, les débits de retour d'eau à prévoir sont ceux figurant au tableau des filtres à retour d'eau seule, pour la même taille de sable. Ces débits sont supérieurs à ceux utilisés pour les filtres à couche unique homogène; les tuyauteries, vannes et pompe de lavage doivent être dimensionnées en conséquence. De plus, la mise en expansion du lit filtrant impose un réhaussement du dispositif d'évacuation des eaux de lavage du filtre.



1 - Entrée d'eau brute (sortie d'eau de lavage).
2 -Sortie d'eau filtrée *(entrée d'eau de lavage.*
3 -Entrée air.
4 - Vidange.
5 - Évent.
6 - Collecteur et ramifications avec buselures.
7 - Détecteur de niveau.
8 - Matériau filtrant.
9 - Système de reprise d'eau de lavage.

Figure 441. Filtre FEGB.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

. Réalisations possibles

Filtres FECB

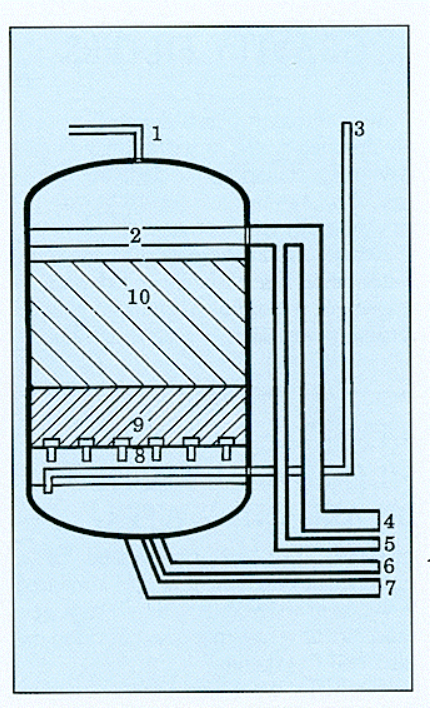
- Filtres verticaux compacts pour eaux corrosives ou eau de mer (figure 441).
- Hauteur de couche de l'ordre du mètre.
- Diamètres de 1,6 à 3,5 m.
- Applications: coagulation sur filtre, déferrisation, décarbonatation.

Filtres FPB

- Filtres verticaux à grande hauteur de couche de matériau à granulométrie élevée, pour eaux de laminoirs et eaux résiduaires huileuses (figure 442).
- Hauteur de couche de 2 m.
- Diamètres de 2,5 à 6 m.
- Applications: eaux de laminoirs, eaux résiduaires huileuses.

Les caractéristiques des lits filtrants bicouches sont les suivantes

Combinaison	**Filtres FECB**		**Filtres FPB**	
	1	2	3	4
Sable TEN mm	0,55	0,7	1,35	1,8
Anthracite TEN mm	1	1,6	2,6	4



1- Event
2 - Goulotte de reprise d'eau de lavage.
3 -Arrivée d'air de lavage.
4 - Départ d'eau de lavage.
5 - Arrivée d'eau brute.
6 - Départ d'eau filtrée.
7 - Arrivée d'eau de lavage.
8 -Plancher à buselures.
9 - Sable.
10 - Anthracite.

Figure 442. Filtre FPB.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. FILTRES OUVERTS

La plupart des installations filtrantes destinées à l'alimentation d'eau potable, ainsi que bon nombre d'installations de clarification d'eaux industrielles ou résiduaires, de fort débit, utilisent des filtres ouverts, en général en béton.

Suivant les cas, l'eau à filtrer ne reçoit au préalable aucun réactif, elle est simplement coagulée sans phase de décantation, ou bien coagulée, floculée et décantée; ce dernier cas est le plus fréquent Le mode de traitement influence la conception technologique des filtres et surtout la conception d'ensemble de la batterie filtrante.

Les filtres ouverts fonctionnent à des vitesses de filtration comprises entre 5 et 20 m.h-1 et peuvent être lavés soit simultanément à l'air et à l'eau, soit successivement à l'air puis à l'eau.

3.1. FILTRES LAVABLES A L'AIR ET A L'EAU

Le lavage de ces filtres s'effectue par retour simultané d'air à fort débit et d'eau à débit réduit, suivi d'un rinçage à débit moyen ne provoquant pas de mise en expansion du lit filtrant.

On peut essentiellement distinguer :

- les filtres AQUAZUR T, utilisés à des vitesses de filtration comprises entre 5 et 10 $m.h^{-1}$ environ,
- les filtres AQUAZUR V, utilisés à des vitesses comprises entre 7 et 20 $m.h^{-1}$,
- les filtres FV1,
- les filtres GREENLEAF.

3.1.1. Les filtres AQUAZUR T

Ils sont caractérisés par :

- un lit filtrant, de granulométrie homogène et qui reste homogène après lavage,

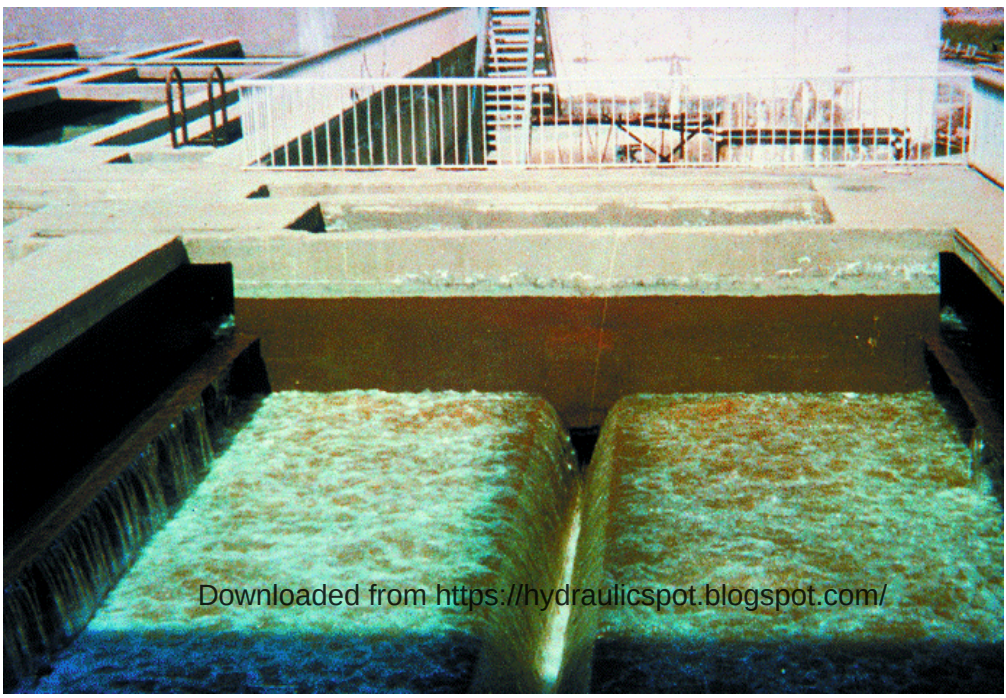

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 443. Filtre AQUAZUR. Phase de lavage air et eau.

dont la hauteur est généralement comprise entre 0,80 m et 1 m,

- une taille effective de matériau comprise entre 0,7 et 1,35 mm,
- une faible hauteur d'eau au-dessus du sable: 0,50 m,
- une chute géométrique réduite, en général 2 m, évitant qu'un trop fort encrassement n'entraîne un important dégazage de l'eau.

Suivant la nature des eaux, et leur tendance à dégazer, la vitesse maximale de filtration peut être de 5 à 10 $m.h^{-1}$.

Les filtres AQUAZUR T sont équipés de buselures à longue queue du type D20 vissées sur un plancher pouvant être constitué

- de dalles de polyester armé (figure 444),
- de dalles de béton préfabriquées (figure 445),
- d'une dalle monolithique.

Cette dernière est réalisée selon la technique des dalles précoulées; elle présente l'avantage d'une construction simplifiée et de (absence de joints.

Dans les filtres T de faible surface, l'air est réparti sous le plancher par un collecteur de soufflerie à pipes (figure 446).

Dans les filtres de plus grande dimension, l'air est distribué par un canal en béton, situé sous une des goulottes d'évacuation des eaux de lavage (figure 447).

Dans les deux cas, cet air est réparti d'une façon égale sur toute la surface du filtre grâce à la constitution d'un matelas d'air par les buselures à longue queue.

Les filtres T comportent trois vannes principales correspondant à l'eau filtrée, l'eau de lavage et l'air de lavage.

L'arrivée d'eau brute est commandée par un clapet qui se ferme automatiquement pendant le lavage lorsque le niveau d'eau dans le filtre devient supérieur au niveau dans la goulotte d'amenée (figures 448 et 449).

L'évacuation des eaux de lavage s'effectue par débordement dans les goulottes longitudinales.

La régulation du niveau de ces filtres

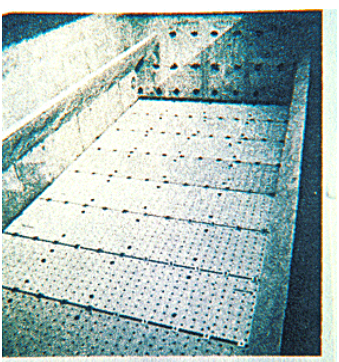


Figure 444. Plaque en poly-armé, de longueur égale à largeur de la cellule filtrante.

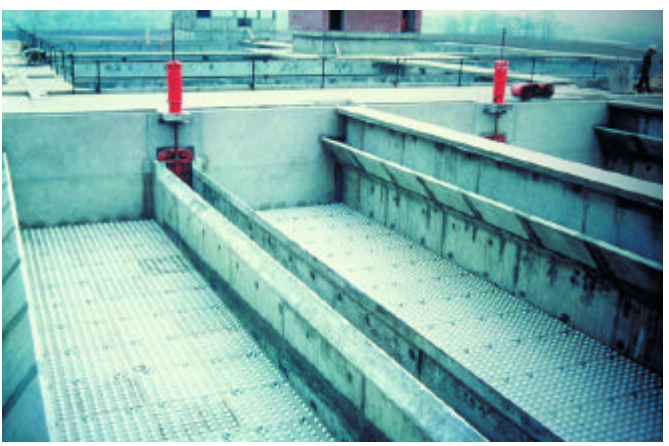
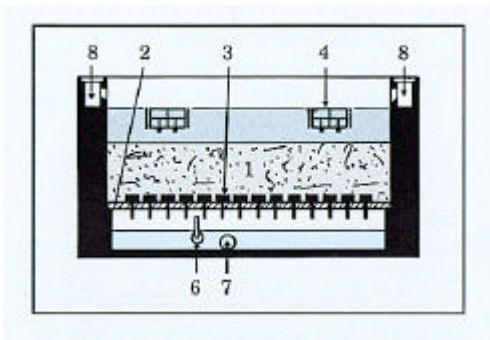


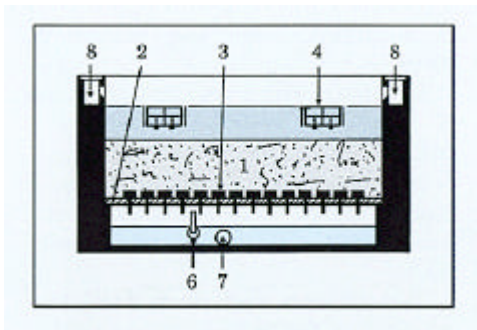
Figure 445. Filtres AQUAZUR Yen cours de construction; vue ester du plancher filtrant avec ses buselures, de la goulotte de balayage la en Y et de la goulotte de départ des eaux de lavage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1- Sable. 2 -Plancher béton. 3 -Buselures. 4 - Clapet d'entrée d'eau. 5 - Canal de distribution air-eau de lavage. Sortie d'eau filtrée.

Figure 446. Filtre AQUAZUR type T à plancher béton et collecteur de soufflerie.



6 - Collecteur de soufflerie. 7 - Entrée d'eau de lavage. Sortie d'eau filtrée. 8 - Goulottes d'évacuation des boues.

Figure 447. Filtre AQUAZUR type T à plancher béton et canal air-eau.

Figure 448. Clapet d'entrée d'eau en position ouverte (filtration).

Figure 449. Clapet d'entrée d'eau en position fermée (lavage du filtre).

est assurée soit par un siphon partialisé, soit par une vanne papillon.

La faible hauteur d'eau qui surmonte le sable (0,50 m) est un avantage important au point de vue de lexploitation: elle permet d'effectuer très rapidement le rinçage puisque les impuretés à évacuer ne sont pas diluées dans une grande quantité d'eau. On réalise ainsi à la fois une économie de temps et d'eau de lavage. L'exploitation de ce type de filtre est d'une extrême simplicité et peut être assurée par une main-d'oeuvre non spécialisée.

Les filtres peuvent être agencés soit en filtres simples (comportant un régulateur par élément filtrant), soit en filtres doubles. Dans ce cas, deux éléments filtrants sont en communication par le haut et par le bas, avec un seul régulateur (figure 450).

. **Lavage des filtres AQUAZUR T**

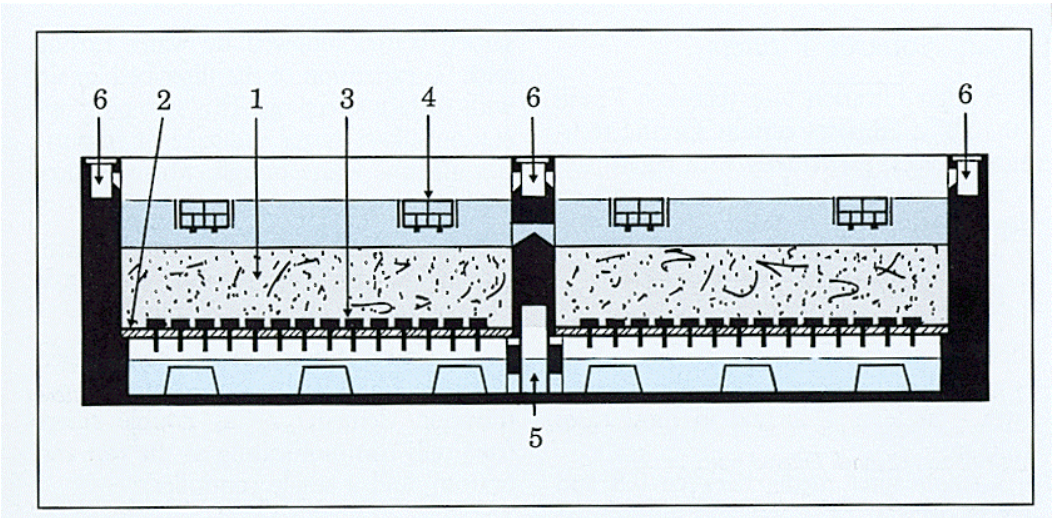
Celui-ci peut être manuel, semi-automatique ou entièrement automatique.

Le cycle de lavage est le suivant :

- constitution du matelas d'air,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. Filtres ouverts



1 - Sable.
2 - Plancher béton.
3 - Buselures.
4 -Clapet d'entrée d'eau.
5 - Canal de distribution air-eau de lavage. Sortie d'eau filtrée.
6 - Goulottes d'évacuation des boues.

Figure 450. Filtre double AQUAZUR type T à plancher béton et canal air-eau.

- soufflage par injection d'air et d'eau, d'une durée de 5 à 10 minutes,
- rinçage à l'eau à grand débit, jusqu'à ce que l'eau évacuée à l'égout soit claire.

Les débits mis en œuvre sont les suivants

- débit d'eau de lavage en soufflage .....5 à 7 $m^3/h.m^2$
- débit d'air de lavage ..... 50 à 60 $m^3/h.m^2$
- débit d'eau de rinçage .....20 $m^3/h.m^2$

La puissance instantanée nécessaire au lavage (surpresseur et pompe) est de l'ordre de 1,5 kW par m^2 ; le lavage dure 15 minutes environ, indépendamment des temps morts. La consommation d'eau de lavage dépend essentiellement de l'eau à traiter et varie généralement entre 1 et 2 % du volume filtré.

. Dimensions standards :

- pour les filtres à collecteur de soufflerie :

Largeur en m	**Surface** en m^2
2,463,07	de 6,5 à 25 de 23,5 à 33,5

- pour les filtres à canal air et eau

Largeur en m	**Surface** en m^2
3	de 24,5 à 38,5
3,5	de 28 à 52,5
4	de 46,5 à 70

Ces dimensions sont celles de filtres à simple cellule et à dalles béton préfabriquées. Dans le cas de filtres à double cellule, les surfaces vont de 49 à 140 m^2.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.1.2. Les filtres AQUAZUR V

Une vitesse de filtration élevée, comprise entre 7 et 20 $m.h^{-1}$, entraîne des choix technologiques particuliers, concernant notamment

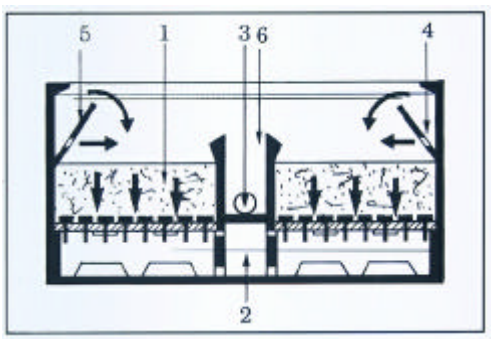
- le choix du matériau filtrant et sa hauteur,
- le mode de lavage,
- l'hydraulique générale.

Les filtres AQUAZUR V (figure 451) sont ainsi caractérisés par :

- une grande hauteur d'eau au-dessus du lit filtrant, égale à 1 m au minimum et, dans la plupart des cas, à 1,20 m,
- une hauteur de matériau filtrant homogène, comprise entre 0,8 et 1,5 m,
- une taille effective du matériau filtrant, en général de 0,95 mm ou 1,35 mm (fourchette extrême: 0,7 mm et 2 mm),
- un lavage simultané à l'air et à l'eau, accompagné d'un balayage en surface à l'eau décantée, suivi d'un rinçage à l'eau, sans mise en expansion du lit filtrant, et toujours avec balayage en surface. Ce balayage permet d'évacuer, plus rapidement les impuretés à l'égout, ce qui réduit la durée du lavage.

Les différents types de planchers et les organes de régulation sont les mêmes pour le filtre AQUAZUR V que pour le filtre AQUAZUR T.

Les filtres AQUAZUR V peuvent également être agencés en filtres simples (comportant un régulateur par élément filtrant), ou en filtre double (deux cellules communiquant par le haut et par le bas et un seul régulateur).



1 - Sable.
2 - Canal d'eau filtrée, air et eau de lavage.
3 - Vanne d'évacuation des eaux de lavage.
4 - Orifice d'entrée de l'eau de balayage.
5 - Goulotte en V.
6 - Goulotte de départ des eaux de lavage.

Figure 451. Filtre AQUAZUR type V, phase de filtration.

. **Lavage des filtres AQUAZUR V**

Le lavage manuel, semi-automatique ou automatique s'effectue suivant les séquences suivantes (fig. 452)

- abaissement du plan d'eau jusqu'au niveau des bords supérieurs de la goulotte de lavage (6) par arrêt de la filtration,
- constitution du matelas d'air,
- soufflage par injection d'air et d'eau avec courant de balayage,
- rinçage à l'eau, avec maintien du courant de balayage, jusqu'à ce que l'eau évacuée à l'égout soit claire.

Les débits mis en oeuvre sont les suivants :

-débit de retour d'eau filtrée de lavage : 7 à 15 $m^3/h.m^2$
- débit d'air de lavage: 50 à 60 $m^3/h.m^2$
- débit de balayage: de l'ordre de 5 $m^3/h.m^2$
- débit de rinçage: 15$m^3/h.m^2$.

Compte tenu des temps de manœuvre des vannes, le lavage dure 10 à 12 minutes et se termine par le remplissage du filtre jusqu'à son niveau normal de filtration.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

. Intérêt du filtre AQUAZUR V

Ce filtre réunit tous les principes qui caractérisent une bonne filtration et un lavage efficace

- l'eau à filtrer continue à alimenter le filtre en totalité ou partiellement pendant toute la durée du lavage, pour assurer le balayage de surface; les autres filtres de la même batterie ne subissent pas, pendant ce temps, d'augmentation brutale de débit ni de vitesse de filtration,
- il est particulièrement adapté aux vitesses de filtration élevées pour lesquelles on peut utiliser des hauteurs de sable de 1m à 2m,
- il conserve une pression positive sur toute la hauteur du sable et durant tout le cycle de filtration,
- son mode de lavage, sans mise en expansion, évite tout classement hydraulique du lit filtrant,
- en lavage, le débit de retour d'eau filtrée est faible, ce qui réduit les équipements et la consommation d'énergie,

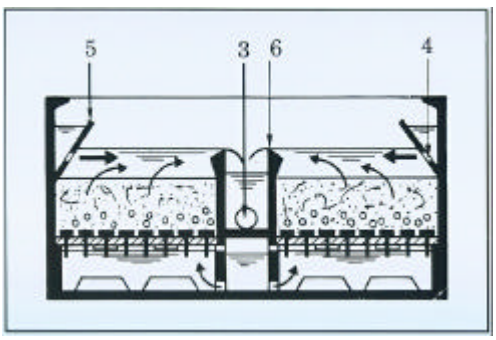


Figure 452. Filtre AQUAZUR type V. Phase de lavage air-eau avec balayage de surface.

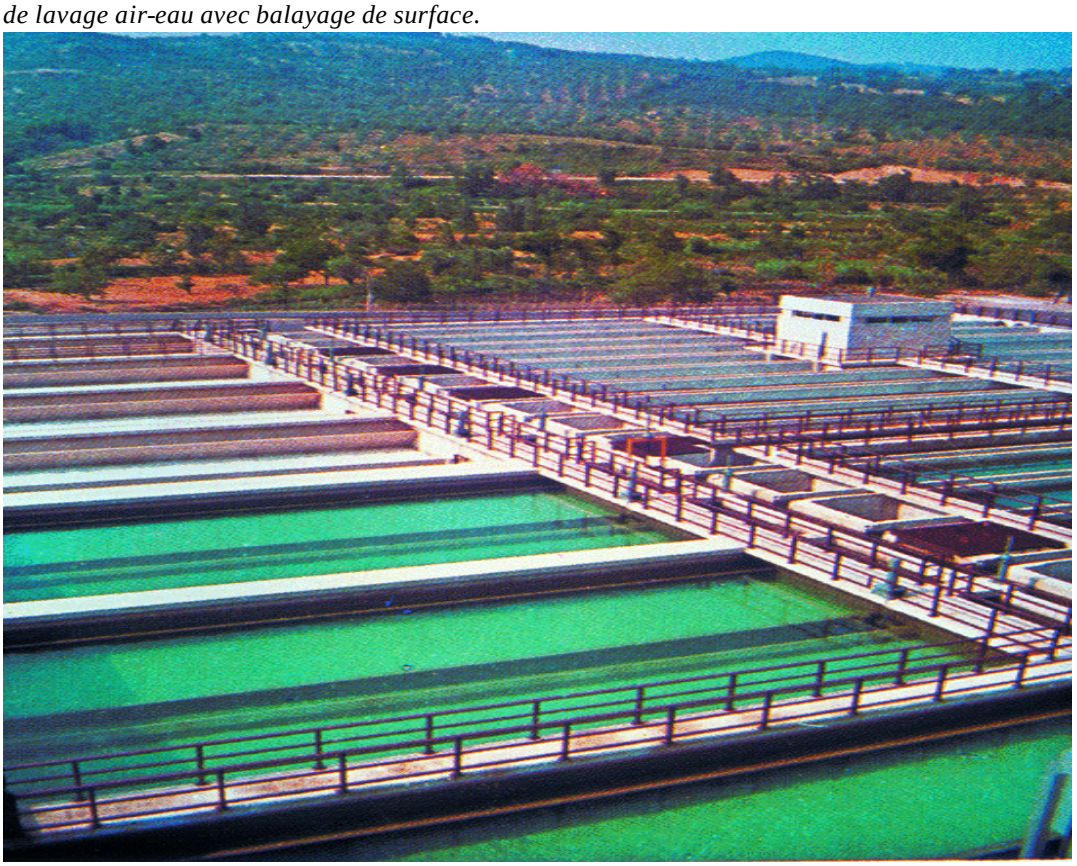


Figure 453. Installation de PERTUSILLO (Italie). Débit. 16200 $m^3.h^{-1}$. Batterie de 14 filtres AQUAZUR V doubles.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- son lavage par retour d'eau pendant toute la période du soufflage se conjugue avec l'action du balayage de surface. La perte d'eau est identique à celle des filtres AQUAZUR T,
- la remise en filtration s'effectue par élévation du niveau ce qui conduit à un démarrage progressif après lavage, quelque soit le type d'organe de régulation retenu. Ce démarrage progressif peut être étendu, si désiré, sur un temps de 15 minutes,
- enfin, le mode de lavage par pompe à débit constant rend inutile l'installation d'un château d'eau surélevé, avec toutes les sujétions qu'entraîne une telle disposition.

. Dimensions standards

Largeur en m	**Surface** en m^2
3	de 24,5 à 38,5
3,5	de 28 à 52,5
4	de 46,5 à 70
4,66	de 56 à 79
5	de 70 à 105

Ces dimensions sont celles des filtres à simple cellule à dalles béton préfabriquées. Dans le cas de filtres à double cellule, les surfaces vont de 45 à 210 m^2.

3.1.3. Les filtres F.V.1.

Ce sont des **filtres métalliques verticaux ouverts** identiques aux filtres AQUAZUR en ce qui concerne (organe de régulation (siphon, vanne papillon) et le lavage à l'eau et à l'air.

La hauteur du matériau filtrant, en général du sable, est essentiellement fonction de la vitesse de filtration et de la charge de matières à retenir.

Leurs caractéristiques (vitesse de filtration, débit d'eau et d'air de lavage) sont identiques à celles du filtre AQUAZUR.

3.1.4. Filtres GREENLEAF

Le système GREENLEAF est utilisé avec une batterie de filtres gravitaires, à lavage par retour d'eau seule.

L'élément principal du système GREENLEAF est l'organe de distribution et de contrôle central Celui-ci permet de commander 4 cellules de filtration ou plus. Les cellules peuvent être circulaires, carrées ou rectangulaires.

. Filtration

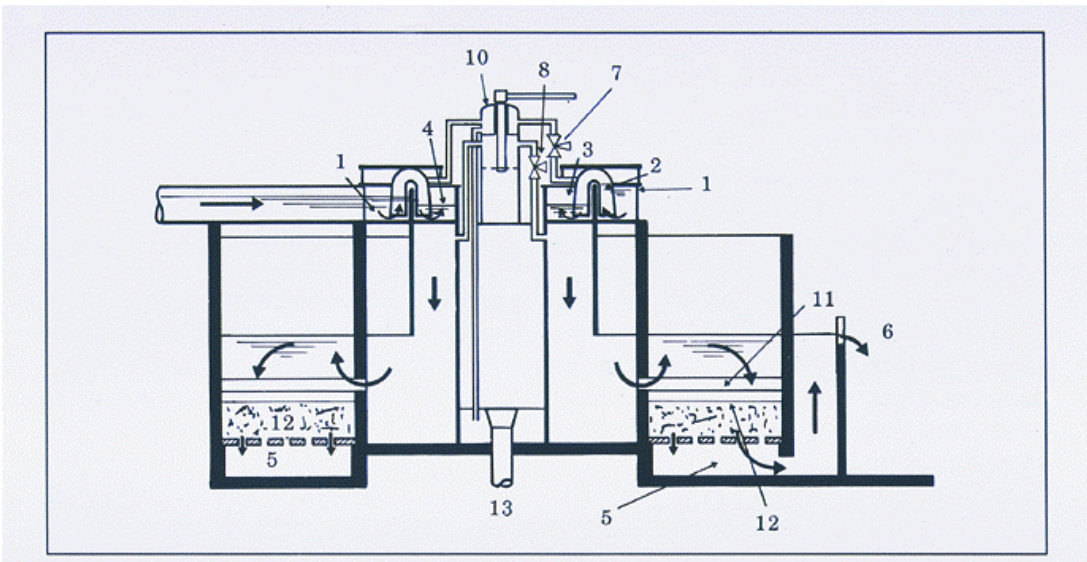
L'eau à filtrer (figure 454) est amenée à l'organe central par une goulotte (1) de distribution annulaire en acier.

Le siphon d'entrée (2) de chaque cellule de filtration amène l'eau à filtrer dans la chambre d'entrée (3) de chaque cellule, munie d'un réservoir d'équirépartition (4). Ces déversoirs d'entrée à niveau constant remplacent les régulateurs de débit

L'eau filtrée est collectée dans la chambre (5) commune à toutes les cellules filtrantes. Elle en sort par le déversoir (6) qui maintient en permanence une charge positive sur le matériau filtrant (12).

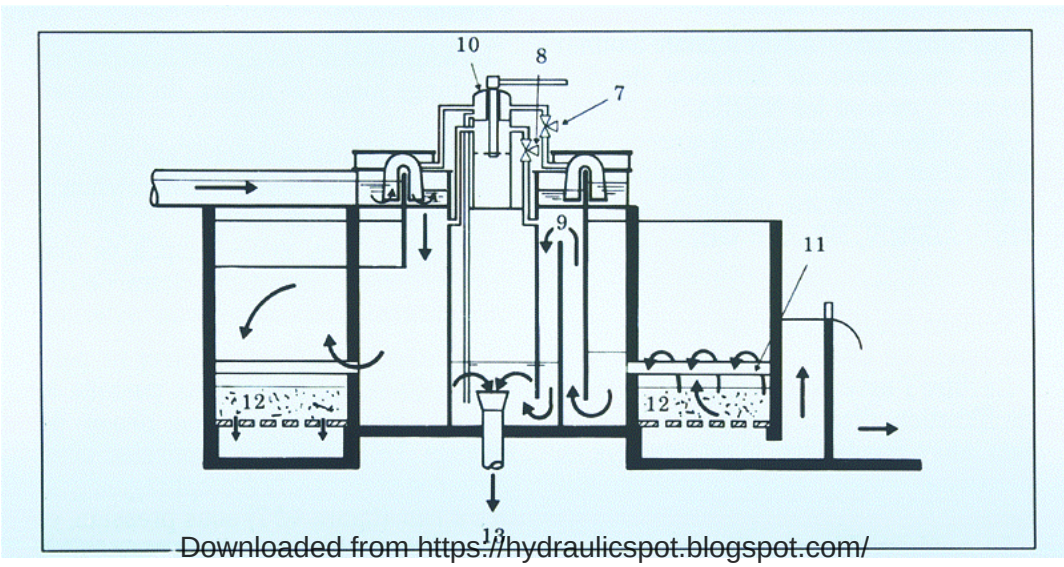
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. Filtres ouverts



1 - Entrée d'eau ù filtrer.
2 - Siphon.
3 - Chambre d'entrée.
4 - Déversoir d'entrée.
5 - Chambre de sortie d'eau filtrée.
6 - Déversoir de sortie d'eau filtrée.
7 - Vanne de commande du siphon d'entrée.
8 - Vanne de commande du siphon de lavage.
9 - Siphon de lavage.
10 - Chambre sous vide.
11 - Goulotte de réception des eaux de lavage.
12 - Sable.
13 - Évacuation des eaux de lavage.

Figure 454. Filtres GREENLEAF en filtration.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 455. Filtres GREENLEAF avec une cellule en lavage.

. **Lavage**

Lorsque le niveau maximal sur une cellule est atteint, le lavage se déclenche (figure 455) : le siphon d'entrée (2) de la cellule est désamorcé par ouverture de la vanne (7). Le niveau d'eau baisse alors jusqu'au déversoir (6).

Les autres cellules restent en fonctionnement.

La fermeture de la vanne (8) met le siphon de lavage (9) en liaison avec la chambre sous vide (10). L'eau monte donc dans le siphon, à la fois depuis le réservoir d'évacuation des eaux de lavage et depuis la colonne centrale du filtre, jusqu'à l'amorçage.

L'eau de lavage, venant du réservoir général d'eau filtrée, passe alors à contre-courant à travers le matériau filtrant, est collectée par la goulotte (11), passe par le siphon (9) puis est évacuée par la vidange (13).

Lorsque le matériau filtrant est propre, le siphon (9) est désamorcé par ouverture de la vanne (8). Le retour en phase "filtration" s'effectue alors par fermeture de la vanne (7) et réamorçage du siphon d'entrée (2).

3.2. FILTRES LAVABLES A L'AIR PUIS A L'EAU

Ce sont des filtres chargés

- soit d'une couche unique de matériau léger, (anthracite ou charbon actif),
- soit de deux couches de matériaux différents (sable-anthracite par exemple),

On distingue;

- les filtres MEDIAZUR à faible hauteur d'eau et vitesse de filtration de 5 à 10 $m.h^{-1}$, ce sont les MÉDIAZUR T et G,
- les filtres MÉDIAZUR à grande hauteur d'eau et vitesse de filtration comprise entre 7 et 20 $m.h^{-1}$, ce sont les MEDIAZUR V, BV, B et GH.

3.2.1. Filtres MÉDIAZUR T et G

Ce sont des filtres conçus pour la mise en œuvre du CAG.

Le filtre T est employé en premier étage de filtration, directement après décantation, alors que le filtre G est employé en deuxième étage, après filtration sur sable.

Le matériau filtrant utilisé en filtration deuxième étage est plus fin, sa taille effective est voisine de 0,55 mm. Pour éviter tout entraînement à l'égout de ce matériau, il est nécessaire de collecter les eaux de lavage sur une grande longueur: plusieurs goulottes transversales sont ajoutées à l'intérieur du filtre MÉDIAZUR G.

De conception identique à celle des filtres AQUAZUR T, ils en diffèrent par les conditions de lavage et l'admission d'eau à filtrer.

La **séquence de lavage** est la suivante

- vidange jusqu'au niveau du matériau filtrant,
- constitution du matelas d'air,
- soufflage à l'air seul (55 à 70 $m^3/h.m^2$)
- purge du matelas d'air,
- rinçage à l'eau seule jusqu'à ce que l'eau évacuée à l'égout soit claire. Ce rinçage assure le reclassement du matériau.

L'admission de l'eau à filtrer ne peut être réalisée par des clapets puisque le lavage commence par une phase de vidange. Le dispositif d'admission comporte des obturateurs à diaphragme gonflés à l'air (figure 457) sous pression, et un seuil épais à l'entrée d'eau pour éviter tout affouillement du lit filtrant.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

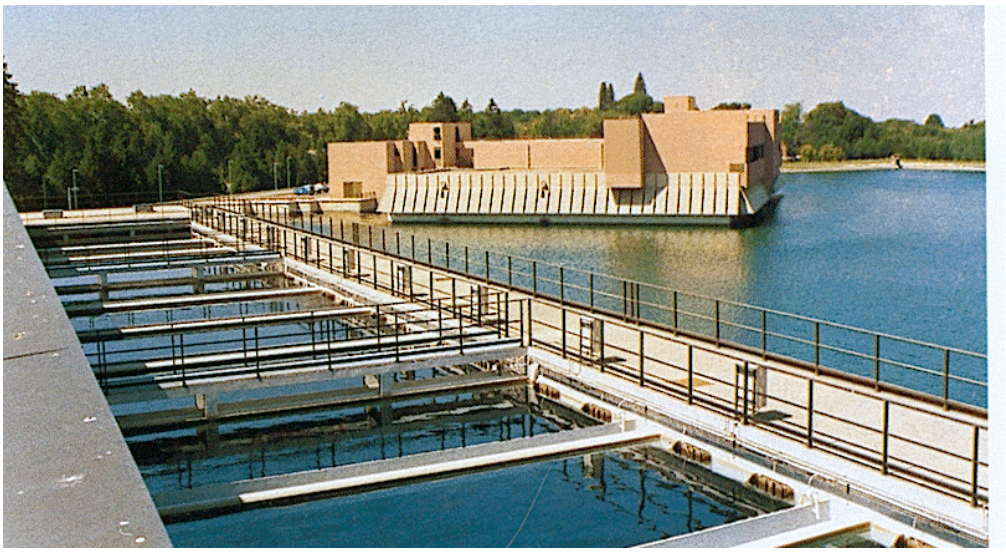


Figure 456. Installation de LOUVECIENNES (Yvelines). Débit: 5000 $m^3.h^{-1}$.
24 Filtres MÉDIAZUR G: - a. Ensemble. - b. Détail.

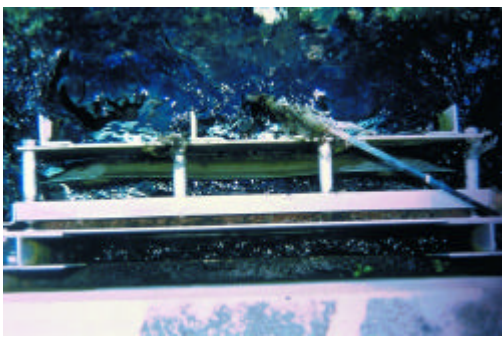


Figure 457. Obturateur gonflable.

b

3.2.2. MÉDIAZUR V, BV, B et GH

Utilisés avec des vitesses de filtration comprises entre 7 et 20 $m.h^{-1}$, leur conception est identique, à l'exclusion du mode de lavage et d'alimentation, à celle des filtres AQUAZUR V.

On distingue

- les filtres à charbon actif utilisés en filtration premier étage, du type MÉDIAZUR V,
- les filtres à charbon actif utilisés en filtration deuxième étage, du type MÉDIAZUR GH,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- les filtres bicouches, du type MÉDIAZUR B et BV ; le lavage du MEDIAZUR B s'effectue sans balayage, celui du MÉDIAZUR BV avec balayage.

Les filtres MÉDIAZUR V, BV, B et GH ont en commun les **équipements** suivants

- une ou plusieurs vannes ou obturateurs à diaphragme, pour isoler totalement l'alimentation en eau à filtrer pendant les phases vidange et soufflage.

Ces obturateurs à diaphragme servent en outre, dans le cas des MÉDIAZUR BV, à isoler partiellement l'alimentation pour réaliser le balayage de surface à vitesse limitée,

- une électrode située au-dessus du niveau supérieur du lit filtrant pour arrêter la vidange du filtre avant lavage,

- un débit d'air de lavage de 55 à 70 $m^3/h\text{-}m^2$,

- un débit de retour d'eau de lavage important, fonction du ou des matériaux constituant le lit filtrant, pour maintenir constante son expansion en période de lavage.

Le filtre MÉDIAZUR GH est aussi équipé de plusieurs goulottes transversales.

La séquence de lavage est la suivante

- vidange jusqu'au niveau du matériau filtrant Cette vidange peut se faire soit par filtration, soit par mise à l'égout,

- constitution du matelas d'air,

- soufflage à l'air seul,

- purge du matelas d'air,

- rinçage à l'eau seule, à grande vitesse, destiné à mettre en expansion le lit filtrant, à chasser les impuretés dispersées sur toute sa hauteur par le lavage à l'air, et à reclasser le matériau.

Pour les filtres MÉDIAZUR BV, cette phase de lavage s'accompagne d'une nouvelle admission d'eau à filtrer par les goulottes d'entrée, pour effectuer un balayage de surface accélérant l'évacuation des impuretés.

Figure 458. Installation de MOULLE (Pas-de-Calais) pour la Lyonnaise des Eaux. Débit: 2 000 $m^3.h^{-1}$. Batterie de 7 filtres MÉDIAZUR V pour CAG.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. Filtres ouverts

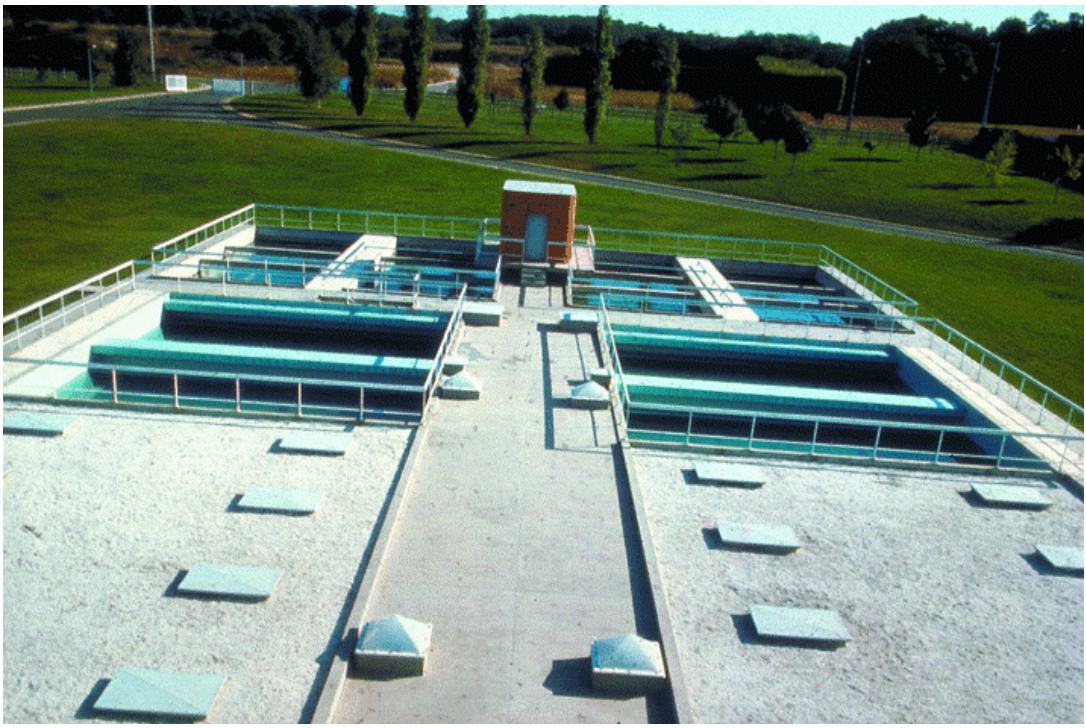


Figure 459. Installation de MORSANG-SUR-SEINE (Essonne) pour la Lyonnaise des Eaux. Débit: 3 800 $m^3.h^{-1}$. Extension phase III..6 filtres MÉD1AZUR GH couverts pour filtration sur CAG.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. FILTRES PARTICULIERS

4.1. FILTRES SANS VANNE AUTOLAVEURS

Ces filtres fonctionnent d'une manière totalement autonome et automatique, en filtration comme en lavage. L'eau à filtrer provient d'un bac de mise en charge et, après filtration à travers un lit de faible granulométrie, remonte vers la réserve d'eau filtrée superposée. Lorsque la réserve est pleine, l'eau part à l'utilisation par débordement.

Quand le lit filtrant s'encrasse, le niveau monte dans la chambre de mise en charge et dans la branche amont d'un siphon. Lorsque la perte de charge maximale est atteinte, l'air comprimé contenu dans le siphon s'échappe et le siphon s'amorce. La réserve d'eau filtrée traverse le filtre à contre-courant pour en assurer le lavage.

Avec ce type de filtre, on a l'assurance de ne jamais atteindre d'encrassement anormal du lit filtrant, car le lavage s'effectue automatiquement pour une valeur de perte de charge fixe et préréglée.

Ces filtres sont utilisables en particulier, lorsqu'on ne dispose ni d'air comprimé, ni d'électricité. Ils conviennent pour des eaux peu ou moyennement chargées de MES, quand le réseau de distribution tolère un arrêt pendant la période de reconstitution de la capacité d'eau de lavage.

En raison de la finesse du sable (TEN 0,55 ou 0,65 mm) et de la faible hauteur de couche, la capacité de rétention est assez faible et les vitesses, pratiquées en général de 5 à 7,5 $m.h^{-1}$, n'excèdent pas 10 $m^3.h^{-1}$.

Ces filtres sont utilisés

- en filtration directe sans coagulant ni floculant (sauf cas particuliers) et sur des eaux peu colmatantes (circuits semi-ouverts de réfrigération),
- en filtration d'eaux décantées,

Ils sont construits pour des diamètres de 1,6 à 4 m.

Figure 460. Installation de LA CASELLA (Italie) pour la centrale thermo-électrique ENEL - LA CASELLA. Capacité: 300 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2. LE FILTRE MÉDIAZUR DOUBLE FLUX

4.2.1. Principe

Le filtre MÉDIAZUR double flux est un filtre spécialement conçu pour la mise en oeuvre de la filtration en deuxième étage sur CAG. Il est constitué (figure 461) de deux cellules de filtration (1) et (2) réunies dans la même enceinte (3). Chacune des cellules comporte un plancher à buselures (4) supportant une couche de charbon actif (CA_1, et CA_2).

L'eau à traiter, précédemment clarifiée et filtrée, entre par la tuyauterie (5) munie d'une vanne d'entrée (6) ; elle traverse ensuite la couche de charbon CA, en flux ascendant, puis passe dans la cellule 2 pour traverser le charbon actif CA2 en flux descendant, et sortir du filtre par la tuyauterie d'eau filtrée (7) équipée d'une vanne de sortie (8). Au centre du filtre est disposé le système de lavage comprenant une arrivée d'eau de lavage (9) pour la cellule 1, une arrivée d'air et d'eau de lavage (10) pour la cellule 2. La cellule 2 est équipée de goulottes transversales (11) pour la collecte des eaux de lavage, qui se déversent dans la goulotte générale d'évacuation (12).

4.2.2. Lavage

La cellule 1, fonctionnant à flux ascendant, ne nécessite qu'un lavage à l'eau.

La séquence de lavage en est la suivante

- arrêt du filtre,
- vidange jusqu'au déversoir de départ des eaux boueuses,
- lavage par courant d'eau ascendant. Le débit à utiliser, variable selon les types et la granulométrie des charbons utilisés, doit être suffisant pour assurer une expansion suffisante et un bon classement du matériau adsorbant

La cellule 2, fonctionnant à flux descendant, nécessite un lavage à l'air, puis à l'eau.

La séquence de lavage en est la même que celle des filtres MEDIAZUR T et G.

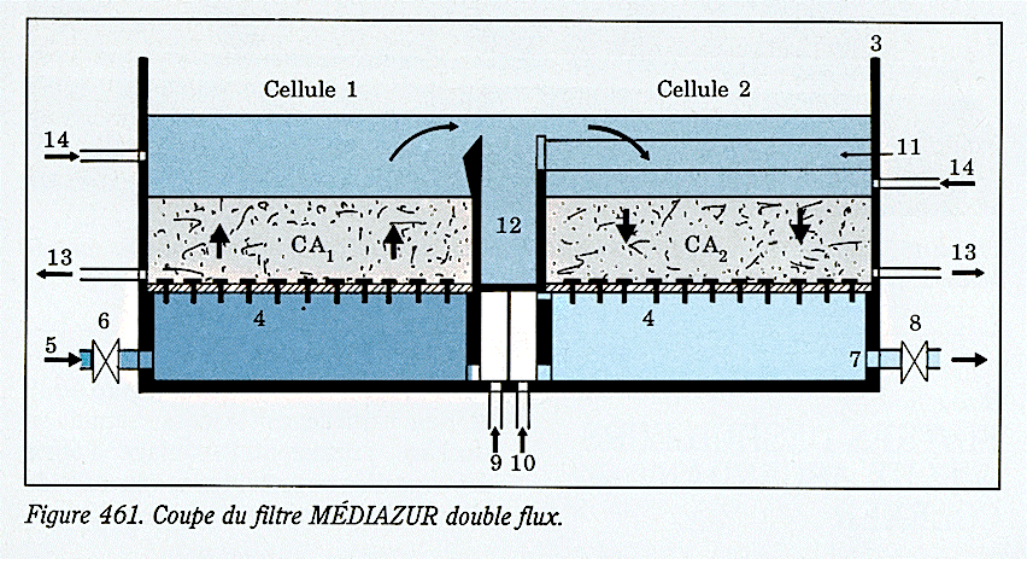


Figure 461. Coupe du filtre MÉDIAZUR double flux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2.3. Fonctionnement

Au début de leur fonctionnement, la cellule 1 et la cellule 2 sont chargées de charbon actif. Lorsque le charbon de la cellule CA, se trouve saturé, le charbon est extrait par un dispositif (13) spécialement adapté pour être dirigé vers la réactivation. Le charbon CA_2 est alors transféré de la cellule 2 vers la cellule 1, en utilisant le dispositif (13) d'extraction des charbons de la cellule 2 et le dispositif d'alimentation en charbon (14) de la cellule 1. La cellule 2 est remplie de charbon par l'intermédiaire de son dispositif d'alimentation (14), soit avec du charbon neuf, soit avec le charbon réactivé.

4.2.4. Avantages

La disposition adoptée, avec deux cellules, permet un contact à "contrecourant", ce qui favorise une bonne efficacité du charbon actif: le charbon envoyé à la réactivation est un charbon qui est effectivement saturé vis-à-vis de la qualité de l'eau à traiter. En outre, lorsque le filtre est utilisé après ozonation, le passage dans la cellule 1 permet la destruction de l'ozone résiduel: l'atmosphère au-dessus des cellules de filtration est donc exempte d'ozone et la couverture à prévoir au-dessus du filtre n'a pas besoin d'une étanchéité parfaite.

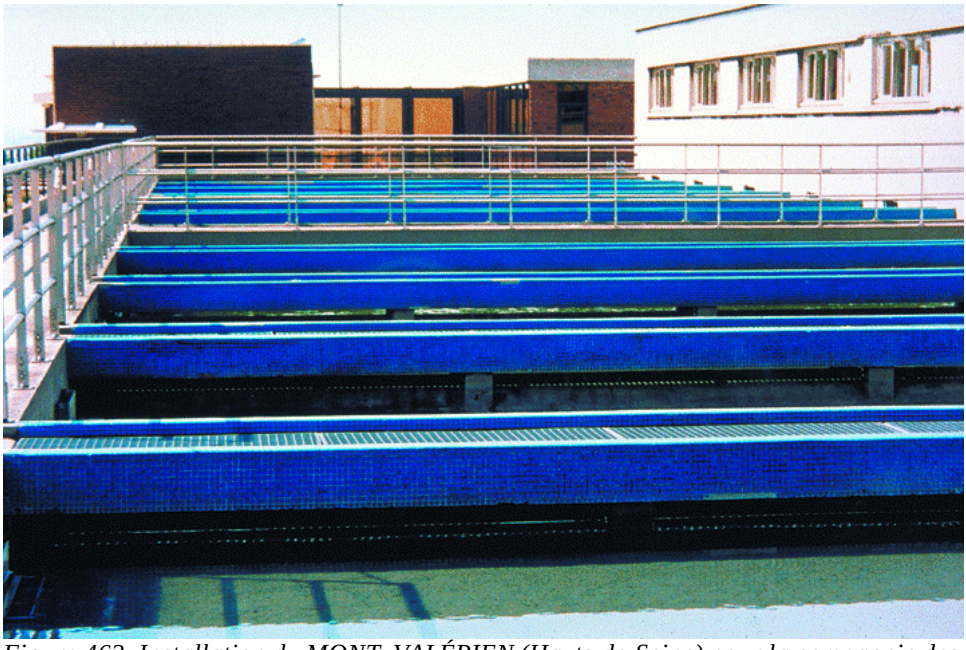


Figure 462. Installation du MONT- VALÉRIEN (Hauts-de-Seine) pour la compagnie des eaux de banlieue. Débit 2 000 m3.h-1. 6 filtres MÉDIAZUR double flux pour CAO.

4.3. FILTRES DÉSHUILEURS A FLUX ASCENDANT - COLEXER

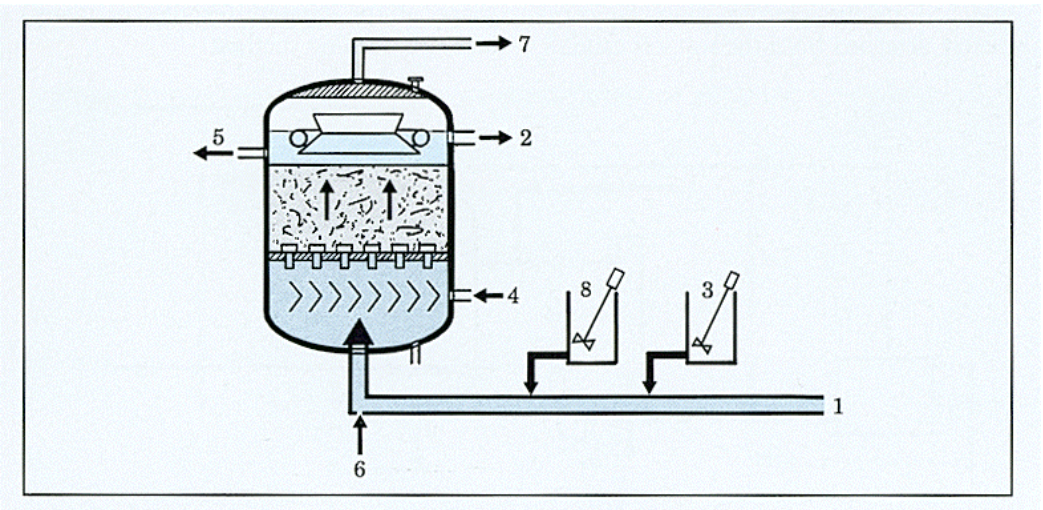
Les filtres à flux ascendant (figure 463), utilisant partiellement la masse filtrante en stockage, présentent l'avantage d'offrir des capacités importantes de rétention de MES mais, par contre, les vitesses ascen-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sionnelles doivent éviter une fluidisation brusque avec entraînement de boues; le lavage doit, par ailleurs, permettre d'évacuer celles-ci à travers tout le matériau. Leur intérêt s'est confirmé dans deux domaines

- le déshuilage de condensats (où la fonction coalescence de l'huile doit être prépondérante) avec collecte continue de l'huile,
- le déshuilage des "eaux de gisement" (où la fonction filtration peut être relativement plus importante).

Figure 464. Traitement de condensats huileux. Débit: 90 $m^3.h^{-1}$.



1 - Entrée d'eau brute.
2 - Sortie d'eau traitée.
3 - Coagulant.
4 - Air de lavage.
5 - Sortie d'eau de lavage.
6 - Fluides de lavage.
7 - Récupération d'huile.
8 - Polyélectrolyte.

Figure 463. Schéma Colexer.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.4.
FILTRES A PRÉCOUCHE
- FILTRES "CANNON"

Ces appareils peuvent assurer la filtration très fine d'eaux extrêmement différentes en taux de MES, par exemple : condensats nucléaires et suspensions de levures.

Ils remplacent les filtres à bougies, en microfiltration, quand des eaux ne sont pas filtrables sans précouche ou quand un gâteau épais est rapidement formé et doit être évacué avec peu d'eau de lavage. Ces appareils sont donc caractérisés par les volumes de gâteau possibles et par les conditions de lavage ou d'extraction de celui-ci.

4.4.1. Lavage

Pour qu'un lavage soit efficace, il faut que les matières retenues, agglomérées à la précouche, se détachent parfaitement des bougies supports. Cet objectif peut être obtenu par un lavage hydropneumatique.

Les nettoyages mécaniques sont employés surtout avec les filtres clarificateurs de suspensions, dans lesquels on recherche la valorisation d'un gâteau sec (filtres à disques)

Un lavage hydropneumatique normal s'opère de la façon suivante.

Après arrêt du filtre et mise en communication de sa partie supérieure avec l'atmosphère, une vidange partielle permet la constitution d'un matelas d'air. On ferme la vanne de mise à l'atmosphère et on comprime cet air sous la pression de la pompe d'alimentation. On ouvre brutalement la vanne située à la base du filtre: la décompression brutale de l'air chasse l'eau qui, traversant les bougies de l'intérieur vers l'extérieur, arrache les dépôts. Ensuite, on procède à la vidange, avec rinçage des bougies.

4.4.2. Construction des filtres

Elle se définit par la forme du support, bougies ou plateaux, et le mode de lavage.

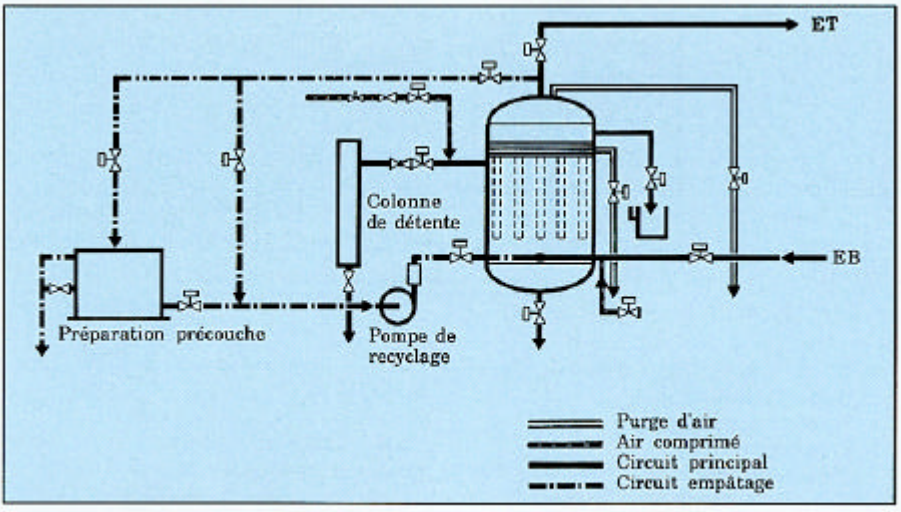


Figure 465. Filtre à précouche CANNON.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 466. Installation de SHELL BRENT (Mer du Nord). Débit: 2100 $m^3.h^{-1}$. Skid de filtration sur bougies.

4.4.2.1. Filtres à bougies

Les filtres CANNON (figure 465) sont constitués par une enveloppe cylindrique fermée, à l'intérieur de laquelle sont disposées verticalement un certain nombre de bougies fixées sur une plaque support. Ces bougies sont des cylindres creux perforés, réalisés en acier inoxydable, sur lesquels est bobiné en mince épaisseur un fil en fibre synthétique formant manchon: le matériau de précouche, mis au préalable sous forme de suspension diluée, vient s'appliquer sur ce manchon.

Ces filtres sont construits avec -diamètre de 0,8 à 1,8 m,

- surface filtrante de 15 à 378 m^2 (120 à 624 bougies). Les vitesses développées sont de 2 à 15 $m.h^{-1}$ suivant la nature et la concentration de la suspension.

. **Lavage CANNON**

On crée un matelas d'air à la partie supérieure du filtre puis, celui-ci étant isolé, on injecte de l'air comprimé sous la plaque support des bougies. Cet air chasse un certain volume d'eau, à travers les bougies, vers le haut du filtre, et met ainsi sous pression le matelas d'air supérieur. On effectue ensuite une décompression brutale de l'air situé sous le plateau, par sa mise à l'atmosphère: l'eau passe de l'intérieur à l'extérieur des bougies à très grande vitesse. Cet effet "Cannon" détache brutalement et instantanément tous les dépôts qui tombent en fond de filtre. On termine par une vidange.

Ce type de lavage permet l'utilisation de bougies de grande longueur, élimine tout risque de colmatage irréversible et conduit à une perte d'eau minimale.

Les applications du filtre CANNON concernent des eaux peu chargées et conduisent à des cycles entre lavages en général très longs

- condensats de centrale PWR et de centrales thermiques (résines diverses).
- injection d'eaux de mer profonde (diatomées ou perlite).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- récupération de condensats huileux (diatomées),
- finition de clarification avant osmose inverse,
- production d'eau ultra-pure.

4.4.2.2. Filtres à cadres ou à disques

Ces filtres comportent des filtres à disques ou à cadres fixes ou tournants, disposés horizontalement ou verticalement. Ces éléments sont eux-mêmes recouverts d'une toile support. Il existe une grande variété de modèles, avec des plateaux simples ou profilés, de façon à obtenir une répartition homogène des dépôts. Les dispositifs de lavage par retour d'eau, combinés ou non avec un mouvement des supports de filtration, ne permettent cependant pas d'atteindre l'efficacité du lavage hydropneumatique, souhaitable pour les filtrations à grande vitesse.

Ces filtres donc sont surtout utilisés dans la filtration lente de suspensions et avec des cycles très courts: hydrométallurgie, industrie pharmaceutique et industries agro-alimentaires.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. CONTRÔLE ET RÉGULATION DES FILTRES

Une batterie filtrante peut comporter n filtres que l'on doit chercher à alimenter le plus régulièrement possible, et tout particulièrement en évitant un sur-débit sur l'un des filtres. Ce problème requiert une attention particulière quand il n'y a que deux à trois filtres en parallèle.

Dans les batteries de filtres sous pression, la pression d'alimentation est généralement importante et les modes de régulation peuvent être simplifiés : diaphragme, éventuellement vanne régulatrice.

Les filtres ouverts se distinguent par trois principaux modes de fonctionnement hydraulique :

- à débit constant, à encrassement,
- à débit constant, avec régulateur,
- à débit variable (ou à flux décroissant).

La somme des débits traités par l'ensemble des filtres doit être égale au débit entrant sur la batterie filtrante.

5.1. FILTRES A DÉBIT CONSTANT, A ENCRASSEMENT

Ce sont des filtres à débit constant et à niveau variable (figure 467).

Une équirépartition du débit total à filtrer est réalisée à l'entrée des filtres, où l'eau chute d'une hauteur variable suivant l'état du colmatage. Quand le filtre est propre, le sable est juste couvert d'eau dont le niveau 1 est maintenu par la cote du déversoir de sortie d'eau filtrée. A encrassement maximal, le niveau atteint la cote du plan d'eau d'alimentation (niveau 2).

En général, l'élévation de ce niveau d'eau est de 1,50 m à 2 m, suivant la

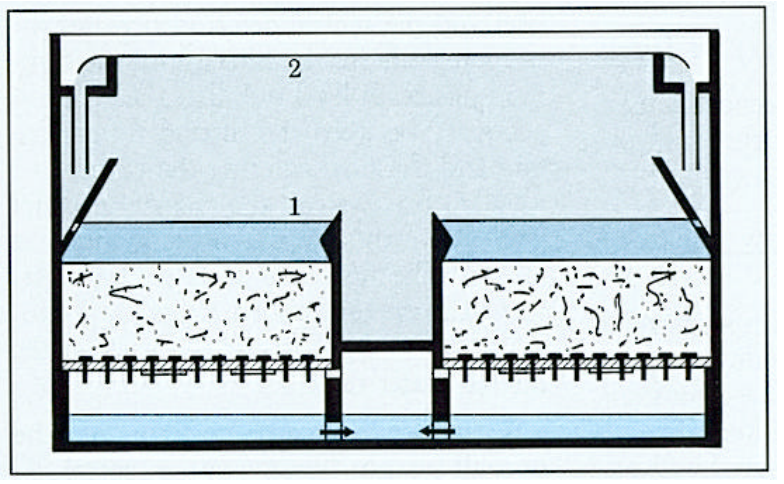


Figure 467. Filtre AQUAZUR Y à encrassement.

1 - Niveau minimal, filtre propre.

2 - Niveau maximal, filtre encrassé

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

granulométrie de la masse filtrante. Cette élévation est plus restreinte (0,80 à 1 m) lorsque le filtre contient non plus une masse filtrante, mais une masse de produit neutralisant n'ayant en principe pas un rôle de filtration. C'est le cas des filtres à Neutralite pour lesquels ce mode de fonctionnement à niveau variable est couramment utilisé.

5.2. FILTRES A DÉBIT CONSTANT ET COMPENSATION DE COLMATAGE

Le niveau de l'eau sur les filtres est fixe ou varie peu; (eau filtrée est restituée 2 à 3 mètres plus bas, à un débit constant et égal au débit total entrant, divisé par le nombre de filtres.

Le maintien du débit constant, quel que soit le degré d'encrassement des filtres, est assuré par un régulateur, placé à la sortie de chacun d'eux, qui agit soit en régulateur de débit, soit en régulateur de niveau, avec une équirépartition préliminaire. Cet organe crée une perte de charge auxiliaire, importante lorsque le filtre est propre, et qui s'annule quand le filtre est totalement colmaté; le régulateur compense le colmatage du lit filtrant.

5.2.1. Régulation d'une batterie de filtres

Deux types de régulation sont en général utilisés: la régulation avec mesure du débit et la régulation avec maintien d'un niveau constant.

5.2.1.1. Régulation avec mesure du débit

Chaque filtre est équipé d'un régulateur, placé sur sa sortie d'eau filtrée, qui a pour rôle d'évacuer un débit constant et identique pour tous les filtres. Le débit d'eau filtrée est mesuré par un système déprimogène (venturi, tuyère...) qui envoie son signal au régulateur; celui-ci le compare à la consigne de débit affichée. Suivant l'écart, le régulateur fait fermer ou ouvrir (organe qui règle le débit sortant (vanne papillon, vanne à diaphragme, siphon) jusqu'à ce que l'équilibre mesure-consigne soit atteint.

Ce mode de régulation est utilisé aussi bien sur des batteries de filtres sous pression que sur des batteries de filtres ouverts.

Dans ce dernier cas (développé ci- dessous), rien ne maintient le plan d'eau sur les filtres. Aussi faut-il ajouter un autre régulateur qui ajuste ce niveau en fonction du mode de régulation d'ensemble de la station.

. **En régulation d'ensemble par l'amont** (figure 468), un organe général détecte le débit entrant et ajuste le débit de consigne individuel des filtres. Si le débit entrant augmente, le niveau en amont des filtres s'élève et le détecteur général augmente le débit de consigne des filtres jusqu'à stabilisation du niveau général amont, traduisant l'égalité entre le débit d'eau filtrée et le débit entrant dans la station.

Dans ce système, la variation de plan d'eau sur les filtres peut atteindre 30 cm. Le débit d'eau à traiter peut être fixé soit par un programme, soit en fonction du niveau dans la citerne d'eau filtrée.

. **En régulation d'ensemble par l'aval** (figure 469) un organe général détecte le niveau dans le réservoir d'eau filtrée et ajuste en conséquence le débit de consi-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

gne individuel de chaque filtre. Un autre régulateur général, placé sur la goulotte alimentant les filtres, en détecte le niveau et agit sur l'organe de réglage du débit entrant dans la station, de façon à fournir aux filtres un débit égal à celui qu'ils ont pour consigne d'évacuer.

La variation du plan d'eau dans la goulotte et les filtres peut également atteindre 30 cm.

1 - Vanne pneumatique d'arrivée d'eau brute.

2 - Décanteur.

3 - Goulotte d'eau décantée alimentant les filtres.

4 - Transmetteur au régulateur pneumatique.

5 - Orifice d'entrée d'eau sur le filtre.

6 - Clapet automatique d'entrée d'eau.

7 - Filtre.

8 - Venturi.

9 -Vanne de régulation.

10 - Régulateur de débit du filtre.

11 - Transmetteur pneumatique du niveau dans la citerne d'eau traitée.

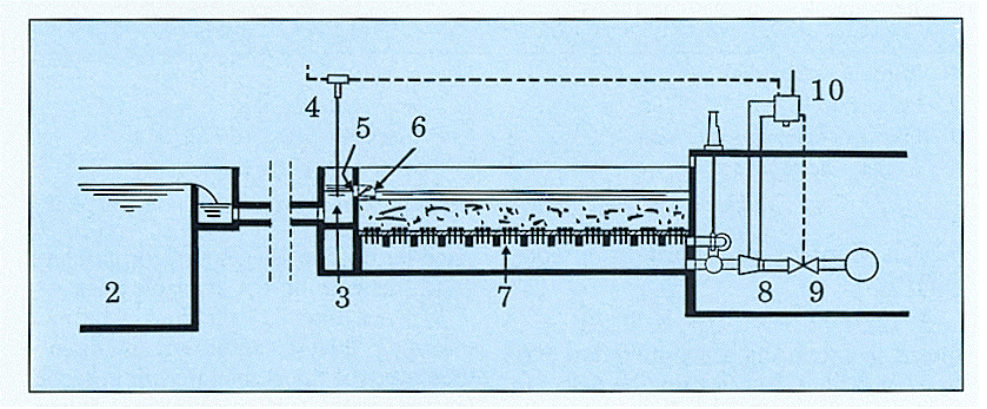


Figure 468. Régulation avec mesure de débit. Commande par l'amont.

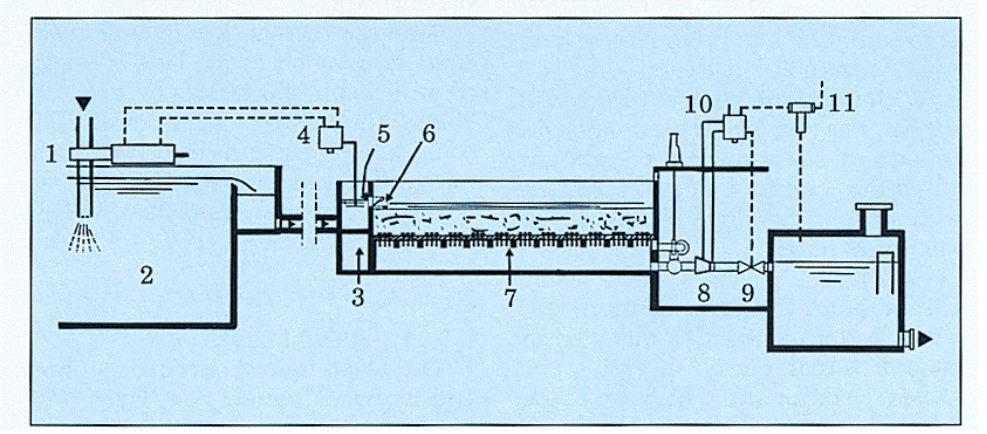
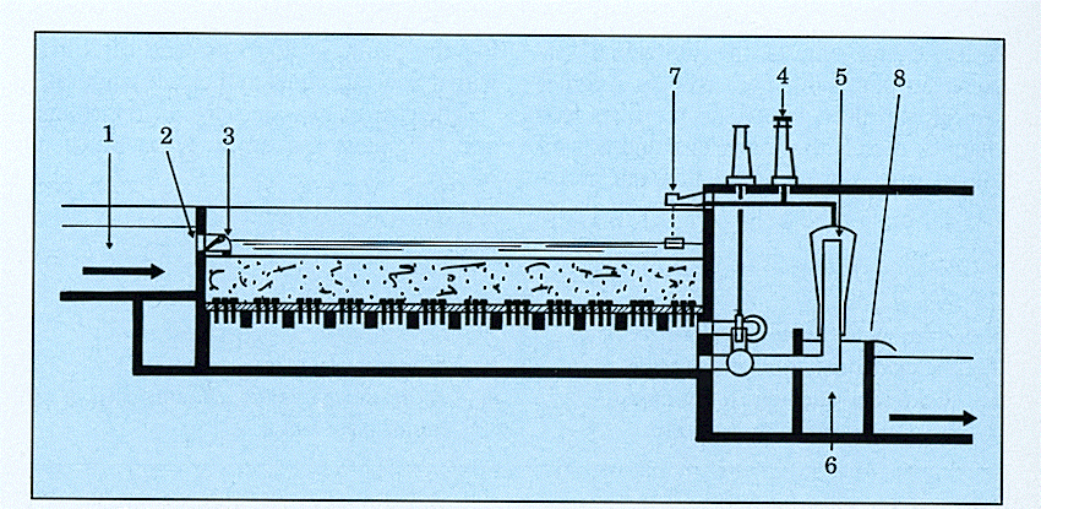


Figure 469. Régulation avec mesure de débit Commande par l'aval.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Goulotte d'eau décantée.
2 -Orifice calibré.
3 - Clapet d'entrée d'eau à filtrer.
4 - Indicateur de colmatage.
5 - Siphon concentrique.
6 - Vasque de restitution d'eau filtrée.
7 - Boîte de partialisation.
8 - Déversoir de sortie d'eau filtrée.

Figure 470. Équirépartition et régulation des filtres AQUAZUR par l'amont (maintien d'un niveau constant)

5.2.1.2. Régulation avec maintien d'un niveau constant

Pour obtenir de chaque filtre un débit constant, on peut passer par l'intermédiaire d'un niveau constant. Dans ce cas, on commence par effectuer une équirépartition du débit total entre les filtres, dont l'organe de sortie est asservi à la cote du niveau constant amont, ou éventuellement aval, pris comme référence.

En régulation amont (voir figure 470) le débit entrant dans la station est d'abord équiréparti à l'entrée de chaque filtre qui reçoit ainsi un débit égal au débit entrant divisé par le nombre de filtres.

Chaque filtre est équipé d'un organe régulateur détectant le niveau amont, qu'il maintient constant en agissant sur l'organe de réglage du débit de sortie.

Grâce au maintien du niveau amont constant, le débit de sortie est égal, au débit entrant et le colmatage est compensé tant qu'il n'a pas atteint une valeur maximale liée à la chute disponible.

Quand on arrête un filtre, le débit total entrant est automatiquement réparti sur les filtres restant en service (sauf dans les filtres à balayage de surface où l'eau continue à alimenter le filtre en cours de lavage).

Dans ce mode de régulation à niveau constant, l'équirépartition du débit est assurée de façon simple et fiable par des dispositifs statiques (diaphragmes, déversoirs). Elle évite les écarts qui peuvent se produire entre débit total filtré et débit entrant comme cela se produit dans les régulations utilisant la mesure du débit

5.2.2. Régulateurs de filtres

5.2.2.1. Régulation par siphon

Le siphon concentrique DEGRÉMONT et sa boite de partialisation (figure 471) permettent de réaliser une régulation de niveau, dont la boîte de par

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tialisation est l'organe de détection et de commande, et le siphon l'organe de régulation.

. Siphon

Il est constitué de deux tubes concentriques, l'écoulement s'effectuant de la branche intérieure vers la branche extérieure (périphérique).

Si l'on introduit de l'air à sa partie supérieure, cet air est entraîné par l'eau dans la branche aval où la densité du mélange air-eau s'abaisse, diminuant ainsi le vide au col. Sans air de partialisation, le vide au col est égal, à la perte de charge près dans la branche aval, à la hauteur "H" de chute entre le plan d'eau sur le filtre et le plan d'eau dans la vasque aval de restitution. Avec la partialisation par de l'air, ce vide est réduit à la hauteur "h_1", égale au produit de "H" par la densité du mélange eau-air. La différence H - h_1 = h_2 représente la perte de charge ainsi créée par l'apport d'air (figure 472).

Si hl représente la perte de charge, filtre propre, due au passage du débit à filtrer à travers le lit filtrant, le plancher et la tuyauterie d'évacuation d'eau filtrée jusqu'au col du siphon, h_2 représente la hauteur de colmatage disponible pour le lit filtrant

Il suffit donc d'introduire, filtre propre, une quantité d'air suffisante pour créer une perte de charge h_2 et, au fur et à mesure que le lit filtrant va s'encrasser, il suffit de réduire le débit d'air jusqu'à l'annuler pour faire accroître hl jusqu'à H.

. **Boîte de partialisation** (figure 473)

C'est l'organe B qui permet d'introduire l'air au sommet du siphon pour en régler le débit Il peut se schématiser sous la forme d'un clapet C suspendu à un ressort D fixé à un point F (figure 472).

En première analyse, à débit constant, F est fixe. Le filtre s'encrasse peu à peu; son débit décroît, ce qui entraîne une diminution de la densité du mélange eau-air et, donc du vide hl au col ainsi que dans l'enceinte de la boîte de partialisation. La section et donc le débit d'air sont alors réduits sous l'action du ressort; la densité du mélange eau-air augmente, déterminant une hauteur hl supérieure à celle qui existait avant encrassement; la quantité d'air introduit dans le siphon diminue. Quand

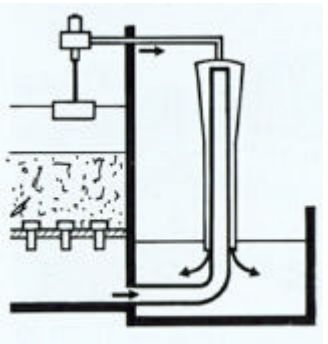


Figure 471

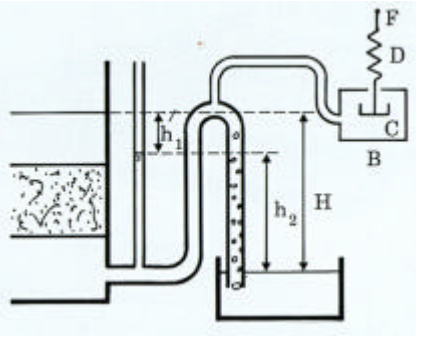


Figure 472.

Figure 473. Botte de partialisation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

le filtre est totalement encrassé, il ne pénètre plus du tout d'air: le filtre débite sous la chute géométrique maximale H. Si on ne lave pas à ce moment, son débit commencera à diminuer.

Cette boîte de partialisation permet donc la compensation automatique du colmatage. Elle permet également d'adapter le débit du filtre au débit total à filtrer; en effet, il suffit que la cote du point F soit reliée au niveau de flottaison du flotteur de la boîte. Une augmentation du débit correspond à une élévation du point F et à la diminution de la quantité d'air qui va vers le siphon. La perte de charge h_2 diminue, entraînant l'augmentation du débit évacué par le siphon.

. Vacuomètre indicateur de perte de charge

Si l'on place un vacuomètre au col du siphon, on mesure le vide hl qui représente la perte de charge à travers le filtre et ses tuyauteries.

. Démarrage du siphon

Pour éviter qu'au démarrage d'un filtre le débit n'augmente brutalement jusqu'à ce que le plan d'eau, sur lequel repose le flotteur de la boîte de partialisation, atteigne son niveau normal, il suffit de prévoir un déplacement progressif du point F ou une entrée auxiliaire d'air allant en s'annulant.

En régulation amont d'un filtre AQUAZUR à faible hauteur d'eau, cette entrée auxiliaire d'air est commandée par un clapet monté sur la boîte.

5.2.2.2. Régulation par vanne

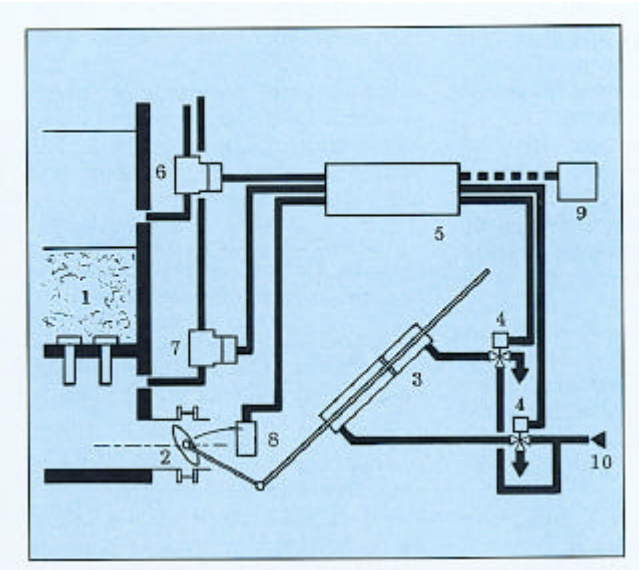
L'organe réglé est une vanne à manœuvre hydraulique ou pneumatique installée sur la tuyauterie de sortie d'eau filtrée.

La figure 475 donne le principe de fonctionnement d'une régulation de type électronique.

Un capteur de pression (6) à jauge de contrainte fournit un signal électrique proportionnel à sa hauteur d'immersion ce signal est comparé à une valeur de consigne, matérialisant le niveau à maintenir constant Tout déséquilibre entre la mesure et la consigne, supérieur au seuil fixé au système, se traduit au sein du

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 474. Installation de BRASILIA (Brésil). Débit: 5000 $m^3.h^{-1}$. Clarification d'eau de surface. Galerie des siphons.



1 - Lit filtrant.

2 - Vanne de sortie d'eau filtrée.

3 - Vérin de commande de la vanne.

4 - Électrovanne de commande du fluide alimentant le vérin.

5 – Régulateur DEGRÉMONT.

6 - Capteur de pression mesurant le niveau du filtre.

7 - Capteur de pression sous le plancher.

8 - Potentiomètre placé sur l'axe de la vanne.

9 - Indicateur éventuel de colmatage.

10 - Alimentation en fluide de commande du vérin.

Figure 475. Schéma de régulation électronique d'un filtre

régulateur électronique (5), après discrimination du sens de ce déséquilibre, par l'ouverture de l'une des deux électrovannes (4) placées sur le fluide alimentant le vérin de commande (3) de la vanne-papillon d'eau filtrée (2), provoquant une tendance à l'ouverture ou à la fermeture de celle-ci jusqu'au rétablissement de l'équilibre.

Un potentiomètre (8), solidaire de l'axe de la vanne, introduit dans la boucle de régulation une réaction à taux réglable, s'annulant progressivement de façon à ramener sans pompage le niveau régulé à sa valeur de consigne.

Cet appareillage, entièrement transistorisé, comporte un certain nombre de dispositifs annexes permettant le réglage de la bande de régulation, du degré de réaction, du gain d'amplification et, éventuellement, de l'ouverture après lavage pour démarrage progressif.

Figure 476. Régulateur programmé DEGRÉMONT.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.2.2.3. Régulateur programmé

L'organe réglé est le même que dans le cas précédent.

Le développement des microprocesseurs a permis de mettre au point un régulateur programmé (figure 476). Au-delà de la simple régulation du débit du filtre, il assure une véritable gestion de (exploitation du filtre, qui peut même être étendue à celle de la batterie.

Chaque filtre de la batterie filtrante est ainsi muni de **son automate programmable.** Ces automates sont reliés par un réseau de communication qui véhicule les informations de procédé et maintient la sûreté de fonctionnement de l'ensemble.

Chaque automate assure les fonctions suivantes

- état du filtre: arrêt, marche ou lavage, sur décision manuelle ou automatique,
- demande de lavage: sur décision manuelle ou en fonction de consignes préétablies (temps de filtration ou perte de charge),
- régulation à niveau constant par action sur la vanne pneumatique de sortie d'eau filtrée,
- cycle de lavage, avec commande des vannes pneumatiques du filtre, et demande de marche ou d'arrêt des pompes et surpresseurs à l'automate gérant les équipements communs de lavage.

Ce cycle de lavage peut se dérouler entièrement automatiquement, être déclenché manuellement, ou être commandé manuellement pas à pas.

Des verrouillages sont prévus pour qu'il ne soit jamais possible de laver deux filtres simultanément, quel que soit le mode de fonctionnement.

Chaque automate est équipé

- d'entrées tout ou rien qui donnent l'état des contacts de fin de course des vannes du filtre,
- de sorties qui permettent le déclenchement du lavage par action sur les vannes, les pompes et surpresseurs de lavage, et la régulation,
- d'entrées analogiques pour la mesure du niveau d'eau, de la perte de charge et de la position de la vanne de sortie d'eau filtrée,

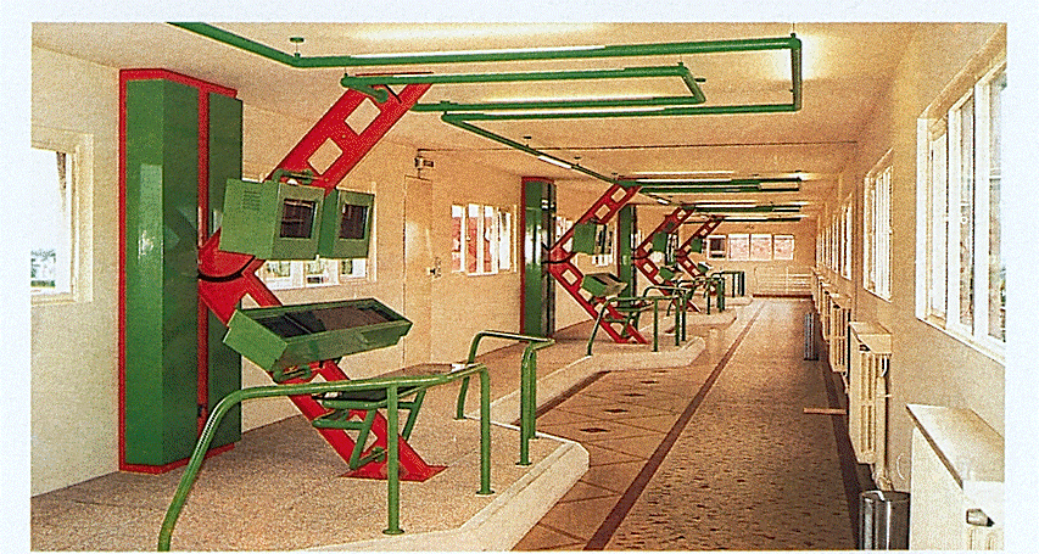


Figure 477. Installation du MONT VALÉRIEN *(Hauts-de-Seine) pour la compagnie des eaux de banlieue. Débit: 2 000 $m^3.h^{-1}$. Clarification d'eau de Seine. Galerie de commande des filtres. 12 filtres AQUAZUR.*

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- d'un microprocesseur gérant la régulation du filtre par ouverture ou fermeture de la vanne de sortie d'eau filtrée en fonction de la perte de charge,
- d'un microprocesseur gérant le cycle de lavage.

A chaque automate est raccordé, pour les dialogues opérateurs, un clavier intelligent comportant des touches "fonction", un afficheur de caractères permettant le stockage des messages.

L'installation de commande de la batterie comprend un **automate commun,** équipé d'un-terminal, qui réalise la gestion des moyens de lavage des filtres, la gestion des filtres, ainsi que le recyclage éventuel des eaux de lavage.

Tous ces automates sont reliés par un réseau de communication qui assure les fonctions principales suivantes

- le dialogue entre les automates de filtres et l'automate commun, afin que ce dernier puisse gérer les conflits de priorité et décider quel filtre doit se laver ou se mettre en marche, et gérer les moyens communs de lavage,
- le dialogue des automates de filtre entre eux, pour effectuer les interverrouillages, afin d'éviter certains fausses manœuvres manuelles et de permettre d'effectuer des lavages même si l'automate commun est à l'arrêt,
- le dialogue entre tous les automates et la salle de contrôle, permettant ainsi au personnel d'assurer une surveillance à distance,
- l'utilisation d'une console de programmation depuis n'importe quel automate, pour une intervention de mise au point ou de diagnostic vers n'importe quel autre automate.

Ce réseau de communication peut être géré par n'importe quel automate appelé "maître", d'une manière transparente à l'utilisateur.

De plus, ce réseau a la particularité d'être "à maure flottant", c'est-à-dire que si le maître est défaillant (qu'il soit déconnecté, mis à l'arrêt, en panne, etc.), les autres automates restant en fonctionnement réélisent entre eux un autre automate maître, toujours sans intervention humaine.

Cette régulation par automate programmable assure une qualité régulière de l'eau filtrée, par le respect rigoureux des diverses opérations de lavage. Elle permet, en outre, d'alléger les interventions du personnel.

5.3. FILTRES A FLUX DÉCROISSANT

Certaines batteries de filtres ouverts peuvent fonctionner à débit variable, sans régulation individuelle, ni sans grande variation de niveau (figure 478).

Les filtres sont alors alimentés en eau décantée à partir d'une même tuyauterie ou d'un même canal, sans chute, puisqu'il n'y a pas lieu de faire de répartition.

L'eau filtrée s'écoule dans des vasques individuelles dont le déversoir (9) est calé pour que le lit filtrant soit couvert à l'arrêt des filtres ou en fonctionnement à petit débit. Chaque sortie de filtre est équipée d'une vanne d'eau filtrée (7) ouverte ou fermée, doublée d'une vanne (8) créatrice de perte de charge auxiliaire. L'alimentation (1) en eau brute est ajustée en fonction du niveau dans la citerne d'eau traitée (11) grâce à un détecteur de niveau (12) et un régulateur général (13).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans un tel schéma, on ajuste la perte de charge auxiliaire p créée par la vanne (8) de telle façon qu'à débit maximal Q traité dans la station

- le débit individuel des filtres varie suivant leur encrassement de ± m % de la valeur moyenne de débit Q/N, N étant le nombre de filtres en service. Ainsi, après lavage, un filtre propre débite: (1 + m/100)Q/N et un filtre encrassé, avant son lavage, débite: (1 –m/100)Q/N.

On retient couramment des valeurs de m variant de 20 à 40 % suivant la vitesse moyenne fixée.

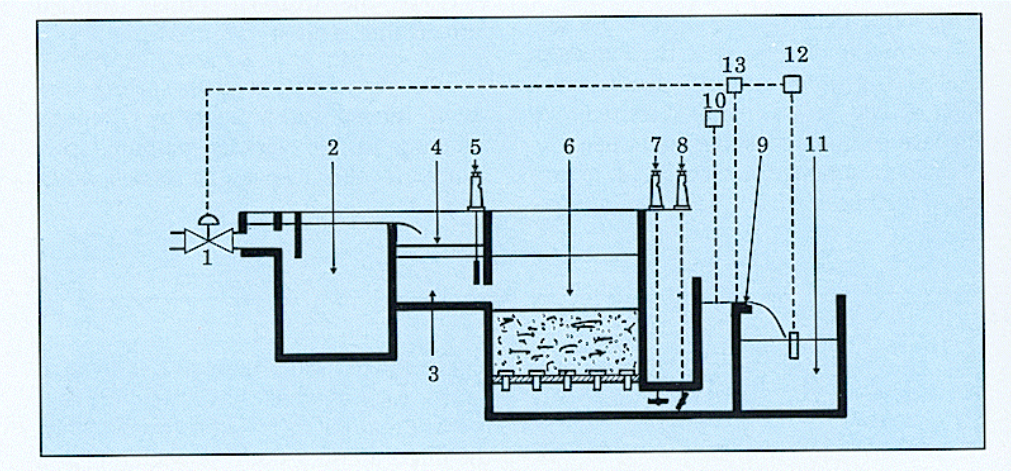
- la perte de charge due à l'encrassement du filtre, avant son lavage, soit telle que, ramenée à sa valeur pour la vitesse moyenne de filtration, elle atteigne les valeurs habituelles de 1,75 à 2 mètres.

Ces deux conditions fixent à la fois la perte de charge auxiliaire p et la chute géométrique à prévoir sur les filtres.

Selon le schéma de la figure 478, le débit d'eau brute est modulé en fonction du niveau dans la citerne et il en résulte un niveau variable sur les filtres. La conduite des filtres à débit décroissant nécessite la connaissance du débit individuel des filtres, qui peut être mesuré suivant le même schéma par la hauteur de lame sur le déversoir (9).

Ce type de régulation des filtres conduit - à une vanne d'entrée d'eau à filtrer (5) de grande section pour éviter toute perte de charge notable,

- à une grande hauteur d'eau au-dessus du lit filtrant,



1 - Vanne d'entrée d'eau brute.
2 -Décanteur.
3 - Goulotte d'alimentation des filtres.
4 - Déversoir de trop-plein.
5 -Vanne d'entrée.
6 - Filtre à débit décroissant.
7 - Vanne de sortie d'eau filtrée.
8 - Vanne de réglage de la perte de charge auxiliaire.
9 - Déversoir de sortie individuelle des filtres.
10 -Débitmètre individuel.
11 - Citerne générale d'eau traitée.
12 - Mesure du niveau dans la citerne.
13 - Régulateur du débit d'eau brute.

Figure 478. Schéma de filtre à débit décroissant avec commande générale par l'aval.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- à une hauteur de filtre et donc à un génie civil plus important que celui d'un filtre fonctionnant à la même vitesse moyenne,
- à une chute géométrique plus faible que celle d'une batterie filtrante fonctionnant à une vitesse constante égale à la vitesse moyenne d'une batterie filtrante à débit décroissant, pour le même accroissement de perte de charge,
- à une qualité d'eau filtrée moins bonne en début de cycle, du fait de la forte vitesse initiale,
- à l'isolement prolongé d'un filtre pour son lavage. En effet, il faut d'abord vider par filtration un volume d'eau important au-dessus du lit filtrant, puis laver et faire un démarrage progressif du filtre, opérations qui peuvent demander près d'une heure par filtre. Ceci oblige souvent à prévoir deux filtres à l'arrêt simultanément, l'un en vidange, l'autre en lavage, ce qui augmente d'une unité le nombre de filtres par rapport à une régulation classique,
- à une exploitation relativement aisée lorsque le débit général et la qualité de l'eau à filtrer sont constants,
- à une exploitation par contre beaucoup plus délicate quand
- le débit général à traiter sur la station varie: il faut alors modifier à chaque variation du débit général la perte de charge auxiliaire créée par la vanne (8),
- la qualité d'eau à filtrer décroît subitement: dans ce cas, le niveau dans la goulotte d'eau décantée s'élève rapidement, les filtres ne pouvant être lavés suffisamment vite. Ceci entraîne des risques de débordement important par le trop-plein (4) qui doit être prévu en amont des filtres.

Figure 479. Installation de BOMBAY I et II (Inde). Débit maximal: 110 000 $m^3.h^{-1}$. Production d'eau potable. 90 filtres AQUAZUR V à vitesse de filtration décroissante. Surface unitaire: 151,4 m^2.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.4. COMPARAISON DES DIVERS MODES DE RÉGULATION

Un filtre donne un effluent d'autant meilleur que son débit instantané est plus stable et que ses variations de débit sont lentes à chaque changement de régime de la station.

La meilleure régulation sera donc celle comportant des régulateurs simples, sûrs et fiables permettant une filtration "sans pompage" et des capteurs qui se réfèrent à des plans d'eau de la plus grande surface possible pour avoir des variations de consigne lentes.

Sous cet aspect, la régulation amont, qui se réfère à la surface totale des filtres, est certainement celle qui donne les meilleurs résultats.

La régulation par automate programmable présente un haut niveau de fiabilité, tout en permettant d'intégrer au système la commande du lavage.

5.5. APPAREILS DE CONTRÔLE

Suivant les types de filtres et leur régulation, il peut être intéressant de connaître

- l'état d'encrassement du lit filtrant, au moyen d'un "indicateur de colmatage" qui peut être, soit un manomètre, soit un vacuomètre (cas de la régulation par siphon). Cet appareil doit être équipé d'un transmetteur à distance lorsqu'on veut réunir l'ensemble des indications et, éventuellement, des enregistrements de perte de charge, dans une salle de contrôle général. ll est muni d'une consigne réglable quand on veut déclencher le lavage en fonction du colmatage du lit filtrant,
- l'état d'ouverture des vannes au moyen de contacts "fin de course" placés sur les vannes du filtre,
- la turbidité de l'eau filtrée. Cette mesure permet de corriger éventuellement le traitement ou la consigne générale de lavage, suivant l'évolution des caractéristiques de l'eau brute. Mais on se contente souvent de mesurer la turbidité à la sortie générale d'eau filtrée,
- le débit d'eau filtrée de chaque filtre, utile pour les filtres travaillant en régulation de débit,
- les débits d'air ou d'eau de lavage; ce contrôle n'est pas toujours nécessaire. Le choix d'un surpresseur volumétrique permet d'avoir l'assurance d'un débit d'air correct. Quant à la mesure du débit d'eau, elle n'est utile que dans les filtres MÉDIAZUR où il peut être nécessaire de régler, en fonction de la température de l'eau, le débit d'eau de lavage nécessaire à la mise en expansion du lit filtrant.

Par contre, pour les filtres AQUAZUR, équipés de sable, où le lavage principal s'effectue par retour simultané d'eau et d'air, le choix correct de la pompe de lavage suffit. La mesure du débit d'eau de lavage garde cependant son intérêt quand on veut totaliser la quantité d'eau de lavage consommée pour cette opération.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

14
PROCÉDÉS MODERNES D'ÉCHANGE D'IONS

1. RÉGÉNÉRATION A CONTRE-COURANT

Dans les procédés conventionnels à cocourant, il n'est pas possible d'épuiser systématiquement le régénérant quand il est mis en contact avec des couches d'échangeurs d'ions en état de saturation décroissante. De plus, la contamination ionique des couches inférieures, par un régénérant chargé en ions à fixer, ne permet pas d'obtenir les qualités d'eau dont l'industrie a de plus en plus besoin.

La régénération à contre-courant (voir page 233) consiste donc à faire percoler les solutions régénérantes en sens inverse du liquide à traiter. Elle se pratique sous forme d'un courant ascendant ou descendant selon le sens de percolation adopté pendant la phase de saturation.

Le courant ascendant conduit normalement à l'expansion du lit de résine qui a deux inconvénients majeurs:

- bouleversement des couches et, par conséquence, réduction du gradient de saturation (qui est d'autant plus favorable à la régénération à contre-courant qu'il est élevé),
- mauvaise répartition des solutions régénérantes, du fait de l'absence de perte de charge dans un lit granulaire en expansion, entraînant "renardage" et insuffisance de contact entre résine et régénérant.

I1 est donc impératif de maintenir le lit d'échangeur d'ions parfaitement compacté pendant toute la durée d'injection du régénérant et de son déplacement à l'eau.

Les différents procédés dits de "blocage", destinés à maîtriser l'expansion du lit de résine, se répartissent en trois catégories.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.1.
BLOCAGE A L'EAU

La solution de régénérant est injectée à la base du lit de résines échangeuses d'ions, en même temps qu'est introduit un courant d'eau de blocage par la partie supérieure de l'appareil, la sortie des fluides s'effectuant en des points de prélèvement situés dans la partie supérieure du lit de résine (figure 480).

Les bilans de régénération ont montré que ce procédé rend difficile une utilisation optimale du régénérant, en raison de l'instabilité du système hydraulique. Les résultats ont toutefois conduit, par rapport à la régénération à cocourant, à une nette amélioration de la qualité de l'eau traitée, à condition de limiter la vitesse ascensionnelle à une valeur comprise entre 2 et 2,5 $m.h^{-1}$

1.2.
BLOCAGE A L'AIR

Cette technique met en oeuvre un assèchement partiel de la couche supérieure du lit de résine, qui présente alors une forte cohésion, supérieure à celle obtenue avec le blocage à l'eau.

Tous les procédés faisant appel à cette technique sont réalisés selon le schéma

- cycle de production de haut en bas,
- régénération de bas en haut.

Cet essorage est obtenu, en début de régénération, par la vidange du dôme de l'appareil au moyen de tubes plongeurs de reprise des éluats, noyés dans la couche supérieure du lit de résine. Il est maintenu pendant toute la durée de l'injection et du déplacement du régénérant, à l'aide d'un débit d'air circulant à travers la couche essorée. Le mélange éluats-air est évacué par le système de reprise. La circulation d'air peut être obtenue, soit par injection d'air surpressé, soit par aspiration au moyen d'un dispositif extérieur, du type hydro-éjecteur (figure 481).

Ce système n'est plus utilisé que dans des cas particuliers où il peut encore présenter un avantage par rapport à d'autres procédés plus récents et plus performants

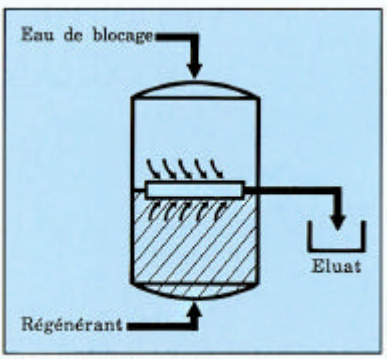
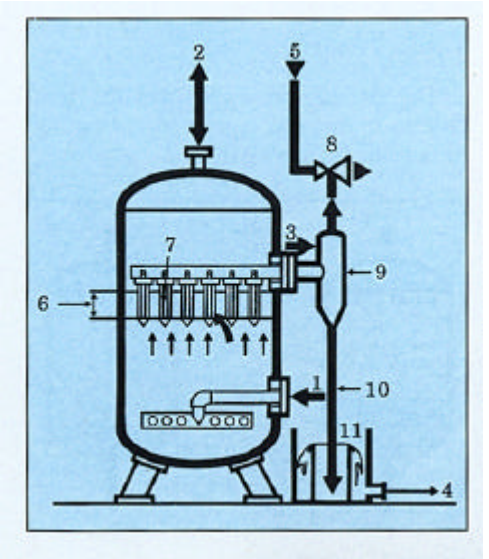


Figure 480. Blocage à l'eau.

Il faut noter que le premier procédé présente l'inconvénient d'utiliser un air surpressé, souvent chaud, qui provoque une déshydratation parfois importante de la partie essorée du lit de résines.

Le blocage à l'air permet des vitesses de percolation du réactif allant jusqu'à $10 m.h^{-1}$, ce qui est d'un grand intérêt dans le cas de la régénération sulfurique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Entrée du régénérant.
2 - Mise à l'atmosphère.
3 - Sortie du mélange effluent de régénération + air.
4 - Sortie de l'éluat.
5 - Entrée de 1'eau motrice.
6 - Couche essorée.
7 - Tubes plongeurs.
8 - Éjecteur.
9 - Boite séparatrice.
10 - Tube siphon.
11 - Pot de garde.
Figure 481. Blocage par aspiration d'air.

Figure 482. Installation de BELLEVILLE (Cher) pour l EDF. Débit: 3 X 115 $m^3.h^{-1}$. 3 chaînes de déminéralisation d'eau d'appoint (CF + élimination de CO_2 + AF + Triobed).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.3. BLOCAGES MÉCANIQUES

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour assurer un blocage mécanique de la résine, telles que le gonflage d'une membrane au moment de la régénération (figure 483), le remplissage de l'espace vide au-dessus du lit de résines par un matériau inerte, etc.

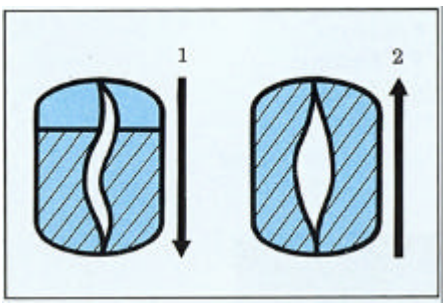


Figure 483. Blocage mécanique par membrane: 1 - Fixation. 2 - Régénération.

Une autre manière de procéder consiste à placer la charge de résine entre deux dispositifs (par exemple, des plateaux à buselures) permettant l'injection du régénérant et l'évacuation de l'éluat, sans que le lit de résine ait la possibilité de s'expanser ; le volume mort situé au-dessus de la résine est pratiquement nul.

Tous ces procédés nécessitent un matériel auxiliaire dans lequel tout ou partie de la résine doit être transféré, afin d'éliminer les fines de résine et les matières en suspension apportées par l'eau brute et les réactifs.

Ils peuvent être classés en deux catégories selon que le sens de percolation du cycle de production est ascendant ou descendant.

1.3.1.Les lits flottants

Le cycle de production s'effectue de bas en haut et la régénération de haut en bas (figure 484).

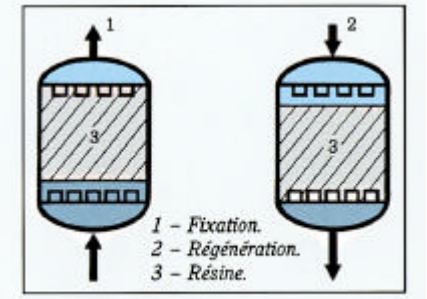


Figure 484. Lit flottant.

En production, grâce à la vitesse de passage, la partie supérieure du lit de résine est compactée contre le système de drainage, alors que la couche inférieure constituée des billes les plus grosses est fluidisée. Cette couche fixe la plus grande partie des ions et travaille à saturation totale alors que la partie supérieure, la mieux régénérée et composée des éléments les plus fins, sert de couche de finition et assure la qualité.

Les inconvénients inhérents au système sont essentiellement

- l'impossibilité d'arrêter et de trop réduire le débit en cours de cycle sous peine de bouleverser les couches du lit de résine,
- en cas d'eau chargée en MES, la partie inférieure du lit de résine retient ces particules, alors que seule la partie supérieure est transférée dans la colonne de nettoyage.

Des variantes de ce système sont proposées pour s'affranchir de ces inconvénients et, en particulier, pour supprimer la colonne de nettoyage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.3.2. Variantes de lits flottants

Dans la première, l'appareil est fractionné en deux chambres superposées, par un plateau (3) équipé de buselures à double tête (figure 485 a).

Le compartiment supérieur est totalement rempli de résine alors que la partie inférieure conserve un volume libre permettant le contre-lavage du lit qui s'y trouve. Les deux compartiments sont reliés par un dispositif (4) qui permet, en cas de besoin, de transférer hydrauliquement les résines. Ceci permet d'effectuer un contre-lavage de la chambre supérieure ; il suffit pour cela de transférer une partie de la résine dans la chambre inférieure. Une fois le contre-lavage terminé, on effectue le transfert inverse. Ce dispositif permet en outre d'interrompre le cycle de production à n'importe quel moment sans qu'il en résulte une détérioration de la qualité de l'eau après remise en service. En effet, la couche de finition de la chambre supérieure reste compacte et ne peut se mélanger avec la résine déjà saturée.

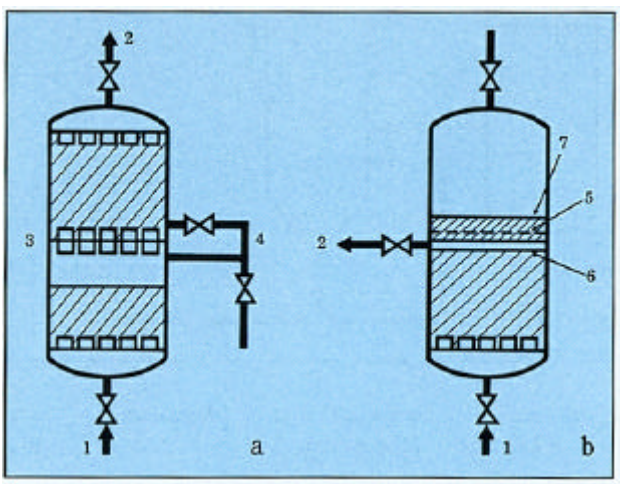
Dans une seconde variante (figure 485 b), l'appareil est partagé à environ 60 % de sa hauteur par un plateau perforé de trous (5) ; le diamètre de ceux-ci est tel que les particules de résine puissent les traverser. Un collecteur de drainage (6) de l'eau traitée est situé immédiatement sous ce plateau perforé. L'appareil est rempli (échangeur d'ions jusqu'au-dessus du plateau. Le dispositif constitué par le collecteur, le plateau et la couche de résine située au-dessus de celui-ci, empêche tout mouvement du lit de résine pendant la phase de production effectuée de bas en haut Par contre, le plateau perforé permet tant l'expansion du lit de résine, le contrelavage de la totalité de celui-ci est possible.

Ce système permet également l'interruption du cycle de production.

1.3.3. U.F.D. (Up Flow DEGRÉMONT)

L'appareil (figure 486) est constitué d'une colonne comportant deux systèmes de répartition et/ou de collecte des fluides (plateaux à buselures ou collecteurs ramifiés) entre lesquels se trouve le lit de résine.

Celui-ci occupe environ 95 % du volume compris entre ces deux systèmes.



1- *Entrée d'eau brute*
2- *Sortie d'eau traitée*
3- *Plateau intermédiaire avec buselures à double tête*
4- *Dispositif de transfert*
5- *Plateau perforé*
6- *Collecteur de drainage*
7- *Résine de recouvrement*

Figure 485. Variantes de lits flottants.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Contrairement aux lits flottants, le cycle de production s'effectue de haut en bas et la régénération de bas en haut.

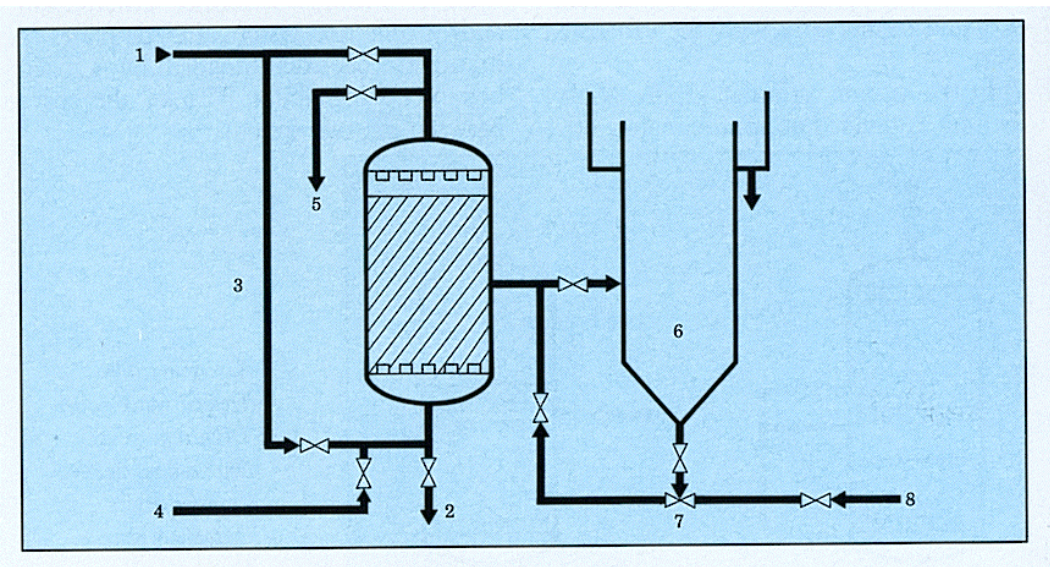
Dans ces conditions, le blocage du lit de résine lors de la régénération est obtenu par une séquence préliminaire dite de "compactage" ; elle consiste à soumettre le lit de résine à un fort courant d'eau ascendant; du fait de la vitesse élevée et de la faible hauteur libre, le lit de résine monte pratiquement en piston et vient se bloquer contre le système de reprise supérieur sans avoir la possibilité de s'expanser et, par conséquent, sans risque de mélange des couches. De plus, le maintien du courant de compactage pendant seulement quelques minutes permet d'obtenir un degré de compacité de la couche de résine tel qu'il est possible ensuite d'injecter les réactifs à des vitesses nettement plus faibles, sans que le lit de résine retombe et se désagrège.

Le fait que le cycle de production s'effectue de haut en bas rend l'UFD insensible aux variations de débit et aux arrêts en cours de cycle. De plus, si l'eau contient des MES, celles-ci sont arrêtées par la couche supérieure du lit de résine. On peut la nettoyer sans bouleverser la couche inférieure qui assure la qualité de l'eau traitée.

La couche supérieure du lit de résine est transférée hydrauliquement dans une colonne de lavage où elle est lavée à l'eau, puis renvoyée dans l'échangeur par voie hydraulique. Il n'est pas nécessaire d'effectuer cette opération avant chaque régénération. Sa fréquence dépend de l'accroissement de la perte de charge en cycle de production. Dans le cas d'eau propre, il est possible de n'effectuer que trois à quatre détassages-nettoyages par an.

1.3.4. Emploi des lits superposés

Il est possible, dans certains cas, de rassembler, dans un seul appareil, des échangeurs à fonction forte et à fonction faible



1 - Entrée d'eau brute. 2 - Sortie d'eau traitée. 3 - Circuit compactage. 4 - Régénérant. 5 -Éluats. 6 - Colonne de lavage-définage. 7 - Éjecteur. 8 - Eau motrice.
Figure 486. U.F.D.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de même polarité, à condition que leur différence de densité soit suffisante. Ces résines se classent alors par détassage à contre-courant, de telle sorte qu'en cycle de fixation, le liquide à traiter traverse successivement la résine faible puis la résine forte, ce qui correspond au schéma d'utilisation classique.

Pour que ce système donne le meilleur rendement, il est impératif de faire la régénération en sens inverse de la fixation et, par conséquent, à contre-courant ascendant.

L'UFD est parfaitement adapté à la mise en oeuvre des lits superposés, du fait du sens de percolation en cycle de production, de l'impossibilité de la mise en expansion du lit de résine supprimant tout risque de mélange des deux résines. Pour effectuer le nettoyage-détassage de la couche supérieure il suffit de transférer la totalité de la résine faible.

L'UFD est utilisable, dans sa réalisation standard, sans qu'il soit nécessaire d'ajouter un plancher intermédiaire pour séparer les deux résines.

1.3.5. Performances des échangeurs régénérés à contre-courant

La régénération à contre-courant permet une économie de réactifs, due à l'utilisation rationnelle de ceux-ci. Avec la même eau et à une capacité utile identique, ce gain peut être de l'ordre de 20

avec les résines anioniques et 40 % avec les cationiques.

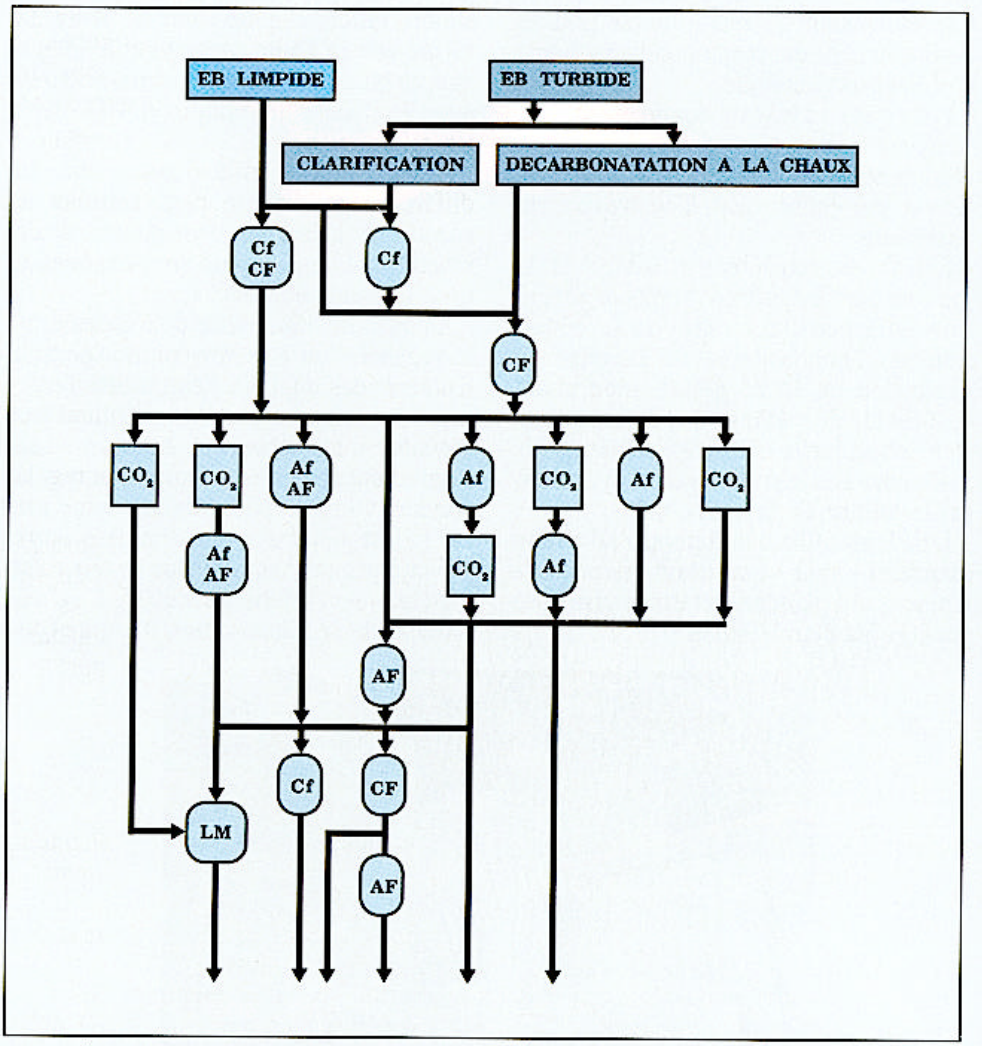
A qualité d'eau traitée comparable, la différence est encore plus nette et le cocourant nécessite des quantités de réactifs qui sont le plus souvent deux à trois fois plus élevées.

A consommation égale de régénérants, la régénération à contre-courant permet d'obtenir des qualités d'eau traitée largement supérieures à celles obtenues par régénération à cocourant. Avec des eaux à salinité et teneur en silice moyennes, la conductivité à la sortie de la chaire primaire est généralement comprise entre 0,5 et 5 $\mu S.cm^{-1}$ et la teneur en silice est généralement inférieure à 50 $\mu g.l^{-1}$. L'utilisation de la régénération à contre-cou-

Figure 487. Installation de NARCEA OVIEDO (Espagne). Débit: 2 X 48 $m^3.h^{-1}$. Déminéralisation d'eau d'appoint de la centrale thermique. Chaire double UFD.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

rant permet souvent d'éviter une chaîne de finition pour l'alimentation de chaudières MP et certaines eaux de fabrication Pour obtenir des qualités encore meilleures, on prévoit des chaînes plus complètes. Le synoptique de la figure 488 présente les combinaisons les plus utilisées en déminéralisation.



Cf – *Échangeur de cations faiblement acide (carboxylique).*
CF – *Échangeur de cations fortement acide.*
CO_2 – *Éliminateur de* CO_2.
Af – *Échangeur d'anions faiblement basique.*
AF – *Échangeur d'anions fortement basique (désiliciant).*
LM – *Lit mélangé.*

Figure 488. Synoptique des combinaisons usuelles d'appareils en déminéralisation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. LITS MOBILES

2.1. ECI (Échangeur continu d'ions)

Tous les procédés décrits ci-dessus mettent en oeuvre des couches de résines fixes, à fonctionnement discontinu, contenues dans des appareils cylindriques verticaux.

Dans ces appareils, chaque unité est caractérisée par un cycle de fixation, de détassage, de régénération et de lavage, à la fin duquel l'échangeur d'ions se retrouve dans son état initial, prêt à accomplir un nouveau cycle.

Ce mode d'utilisation présente un certain nombre d'inconvénients

- mise en couvre de volumes de résines calculés le plus souvent en fonction non du débit horaire, mais de l'autonomie souhaitée entre deux régénérations, ce qui conduit, dans le cas des fortes salinités, à l'immobilisation d'énormes quantités de résines,
- interruption de la production de liquide purifié pendant toute la durée de la régénération, ce qui oblige à doubler les chaînes de traitement ou à prévoir des stockages importants de liquide traité,
- complexité des manoeuvres de régénération,
- consommation importante d'eau de détassage et de rinçage.

D'autre part, du fait que l'on est contraint d'arrêter le cycle au moment où une fuite ionique apparaît au bas de la couche, c'est-à-dire bien avant que toute la résine soit saturée, la résine travaille avec des rendements de fixation et de régénération très inférieurs à la théorie. Aussi, l'idée de substituer, au mode d'utilisation classique, un procédé continu à contre-courant, a-t-elle attiré depuis longtemps l'attention des spécialistes de l'échange d'ions.

Les difficultés à vaincre concernaient en particulier

- la circulation régulière et contrôlée de la résine,
- la séparation de la résine épuisée et de l'eau traitée,
- la répartition correcte des fluides dans un lit de résine mobile,
- l'emploi d'un mode de transfert n'exerçant pas de contraintes mécaniques sur les grains de résine,
- les dispositifs de contrôle et de régulation.

Toutes ces difficultés ont été surmontées au cours de la mise au point du procédé ECI-DEGRÉMONT qui, dans sa version actuelle, apporte diverses améliorations et simplifications par rapport aux procédés antérieurs (ASAHI...).

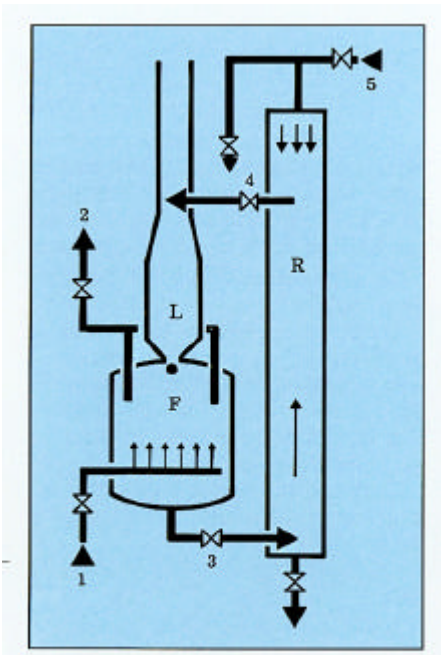
2.1.1. ECI à un seul échangeur de fixation

Le schéma le plus simple met en oeuvre un ensemble d'appareils comportant (figure 489)

- une colonne de fixation F pour la production de l'eau traitée,
- une colonne de régénération R,
- une colonne de lavage-définage L destinée à éliminer les fines de résines et d'éventuelles MES et, si nécessaire, à parfaire le rinçage de la résine régénérée.

Ces colonnes sont du type à **lit compacté.** La résine circule de façon semi-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 – Entrée d'eau brute. 2 – Sortie d'eau traitée. 3 – Transfert résine épuisée. 4 – Transfert résine régénérée. 5 – Régénérant.
Figure 489. ECI à un seul échangeur de fixation.

continue à intervalles programmés, passant du bas de la colonne de fixation à la colonne de régénération puis à la trémie de lavage avant d'être réinjectée dans la colonne de fixation. Du fait que tous les liquides circulent à contre-courant des résines, les divers échanges, fixation, régénération, lavage, s'effectuent avec le rendement optimal: les volumes de résines sont réduits et les rendements de régénération considérablement accrus.

On règle, a priori, les débits de liquide brut, de régénérant, d'eau de dilution et d'eau de lavage, et la circulation de résine est prédéterminée par le réglage de la fréquence des transferts effectués à partir du compartiment doseur situé au sommet de la colonne de régénération. En cas de variations dans la composition du liquide brut, on fait varier le taux d'injection de régénérant et la vitesse de circulation de la résine.

La description précédente est relative à un échangeur d'ions simple, c'est-à-dire à une installation

- d'adoucissement (résine cationique régénérée au chlorure de sodium),
- d'élimination de cations (résine cationique régénérée par un acide).

Si on envisage une déminéralisation du type classique à deux échangeurs séparés, cation + anion, il suffit de disposer en série deux systèmes identiques comportant chacun trois colonnes. Ils mettent en oeuvre, l'un une résine cationique régénérée à l'acide, l'autre une résine anionique régénérée à la soude ou à l'ammoniaque.

La qualité de l'eau obtenue est limitée par la fuite ionique de l'échangeur de cations, celle-ci étant conditionnée par le taux de régénération et par la salinité du fluide à traiter. Si on souhaite une qualité d'eau très élevée (conductivité inférieure à un $\mu S.cm^{-1}$, silice à 50 $\mu g.l^{-1}$), la solution consiste à utiliser un lit mélangé continu cation-anion dont la figure 490 donne le schéma et les phases essentielles d'utilisation.

2.1.2. ECI en lit mélangé

Le poste comporte

- une colonne de fixation à lit mélangé (FLM),
- une colonne de division des résines, du type à lit fluidisé (DLM),
- deux sas (SC et SA) permettant le transfert, sous pression, de la DLM vers les

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

colonnes de régénération cationique et anionique,

- deux colonnes de régénération, l'une pour l'échangeur de cations (RC), l'autre pour l'échangeur d'anions (RA).

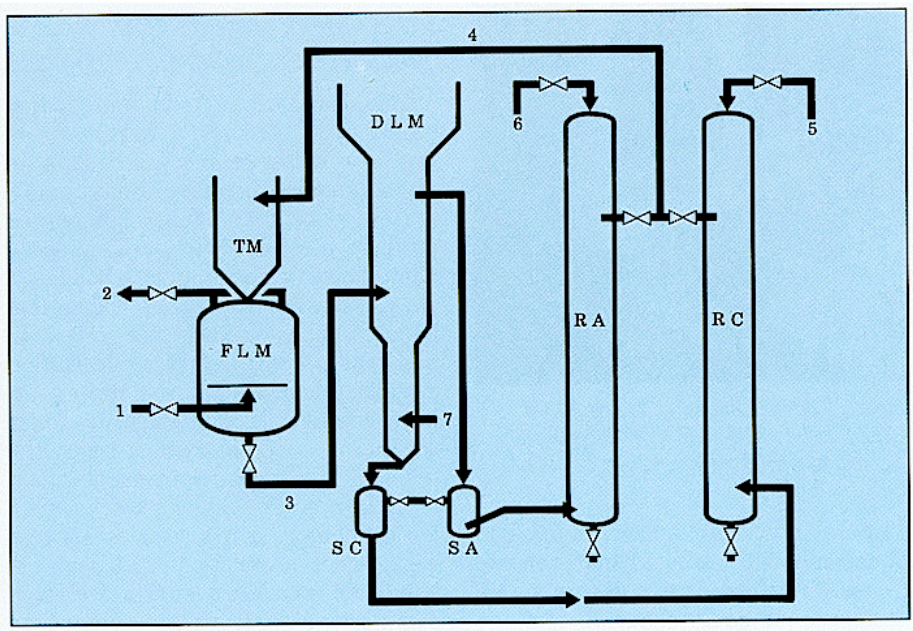
Étant donné que, dans un lit mélangé, il n'est pas nécessaire de pousser le lavage jusqu'à élimination totale des dernières traces de sels, la colonne de lavage est remplacée par une trémie de mélange (TM) de taille réduite.

La colonne de division est alimentée en résines mélangées par transfert hydraulique à partir du bas de la colonne de fixation et assure la séparation franche des résines cationique et anionique, les premières étant soutirées à la partie basse, les secondes à un niveau judicieusement choisi dans la zone supérieure de la colonne.

Un détecteur de niveau de résines, placé dans la colonne de division, agit sur un robinet automatique qui permet de démarrer ou d'interrompre l'alimentation en résines suivant les transferts effectués vers les colonnes de régénération, qui fonctionnent comme il a été dit précédemment

Les résines régénérées et lavées sont transférées par voie hydraulique dans la trémie de mélange qui alimente la colonne de fixation.

Le débit de circulation de résine est déterminé très simplement en multipliant le volume de chaque compartiment doseur (sas) par la fréquence des transferts.



1 – Entrée d'eau brute. 2 – Sortie d'eau traitée. 3 – Transfert résine épuisée.
4 – Transfert résine régénérée. 5 – Acide de régénération. 6 – Base de régénération.
7 – Eau de fluidisation.

Figure 490. ECI en lit mélangé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ce type d'installation s'applique à des eaux relativement pauvres en bicarbonates. En effet, la conception même du lit mélangé empêche l'élimination par voie physique du CO_2 des bicarbonates. L'échangeur d'anions doit donc fixer la totalité de ce dioxyde de carbone, ce qui peut entraîner un investissement important en résine et une consommation de soude inutile.

Figure 491. Installation de MANNHEIM (RFA). Débit: 210 m3.h^{-1}. Déminéralisation de l'eau d'appoint de la centrale thermique. Système ECI.

Aussi, la solution la plus économique pour traiter une eau bicarbonatée en vue d'obtenir une eau de très grande pureté comporte une décarbonatation continue sur résine carboxylique, établie suivant le schéma de la figure 489, une élimination physique de l'acide carbonique, et un lit mélangé continu.

L'économie d'acide est assurée par la régénération en série de la colonne de régénération sulfonique, puis de la colonne de régénération carboxylique, le système comportant un bac intermédiaire permettant d'effectuer une dilution secondaire, si l'eau brute est riche en calcium et que l'on veuille éviter une trop grande concentration en sels de calcium dans l'éluat de la régénération carboxylique.

Ce procédé permet donc de réduire la consommation d'acide par la régénération combinée décrite ci-dessus, et la consommation de soude par combinaison de l'élimination physique du $C0_2$ des bicarbonates et de la régénération systématique à contre-courant.

2.1.3. Application de l'ECI aux problèmes de l'industrie chimique

Lorsque l'on désire traiter une solution représentant une valeur importante et que l'on souhaite récupérer **sans la diluer** (liquides sucrés, solutions uranifères, solutions de produits chimiques à purifier), il est essentiel que le procédé n'introduise pas de dilution sensible.

Les procédés discontinus comportent toujours obligatoirement une forte dilution, car le passage de la phase de fixation à la phase de régénération, et réciproquement, entraîne nécessairement des zones de descente et de montée en concentration, et des lavages relativement importants. Le procédé continu permet de limiter la dilution, à des valeurs souvent négligeables, à condition de récupérer le liquide de transfert des résines à l'aide d'une colonne spéciale dite **colonne de séparation.** La conception de cette colonne est telle que la séparation de la résine et du liquide concentré s'effectue dans une zone où la dilution, très faible,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

n'introduit qu'un très petit volume d'eau supplémentaire dans le circuit de traitement.

2.1.4. Avantages particuliers du procédé ECI-DEGRÉMONT

Par rapport aux autres procédés continus, demeurés le plus souvent au stade de pilotes, le procédé ECI-DEGRÉMONT présente les avantages spécifiques suivants

- les résines et les fluides circulent toujours à contre-courant et dans le sens le plus rationnel, du fait que les solutions régénérantes sont toujours injectées sur des résines parfaitement compactées,
- le transfert des résines se fait par entraînement hydraulique et sans aucune contrainte mécanique,
- les colonnes de fixation, régénération ou lavage, sont calculées indépendamment les unes des autres et peuvent s'adapter à chaque cas particulier de débit, de salinité et de rendement de régénération,
- les dispositifs de répartition et de compactage ont été soigneusement étudiés pour réduire à son minimum la hauteur du plateau théorique et se rapprocher le plus possible des rendements déduits des courbes d'équilibre.

En outre, un autre avantage commun à tous les procédés continus consiste dans le fait que les éluats de régénération acides et alcalins sont émis à des débits **constants** de faible valeur et que leur neutralisation, beaucoup plus facile à réaliser que dans le cas d'un procédé discontinu, ne nécessite pas l'installation d'une fosse importante de neutralisation.

2.2. LITS FLUIDES

Il existe des cas où l'échange d'ions par percolation sur une colonne de résine compacte est rendu impossible, soit par la présence dans le liquide à traiter d'une quantité importante de MES (suspensions uranifères), soit par la formation de précipités en cours de traitement (production de composés peu solubles en sursaturation, variation de pH...). Dans ces conditions, il est possible de prévoir des colonnes dans lesquelles le lit de résine est maintenu en expansion par un courant ascendant du liquide à traiter. Pour obtenir une saturation convenable de la résine et une bonne qualité de l'effluent traité, une solution consiste à utiliser plusieurs colonnes identiques en série, la résine circulant de l'une à l'autre à contre-courant du liquide à traiter, vers un poste de régénération (figure 492).

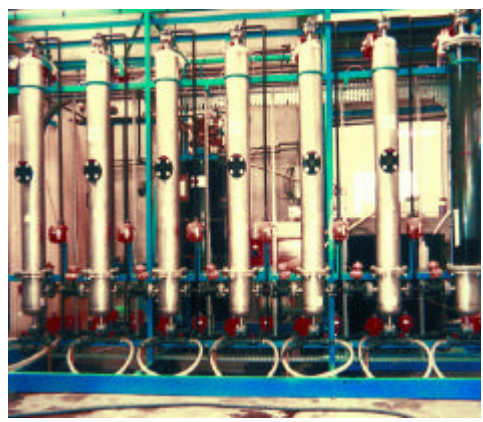


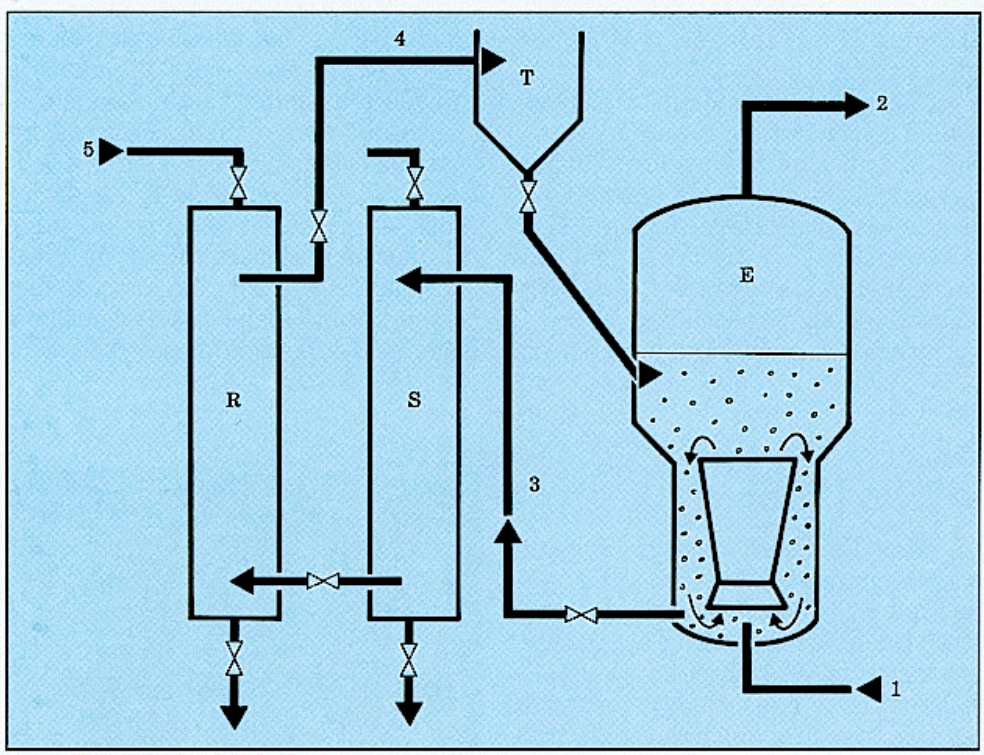
Figure 492. Installation de BESSINES (Haute-Vienne) pour la COGÉMA. Pilote pour le traitement de liqueurs uranifères.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.3.
LITS TURBULENTS

Dans certains cas, la mise en contact de la résine avec le liquide à traiter peut nécessiter un brassage énergique. L'installation comporte (figure 493) - un réacteur (E) dont la partie active est du type TURBACTOR (voir page 638),

- une colonne de séparation (S) de type ECI,
- une colonne de régénération (R) de type ECI,
- une trémie d'alimentation (T) du réacteur en résines régénérées.



1 – Entrée du liquide à traiter.
2 – Sortie du liquide traité.
3 – Transfert des résines saturées.
4 – Transfert des résines régénérées.
5 – Solution de régénération.

Figure 493. Installation à lit turbulent.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. TRAITEMENTS ANNEXES

3.1. ÉLIMINATION DES MATIÈRES ORGANIQUES

Dans la présentation des procédés par échange d'ions, il a été supposé que l'eau brute ne contenait que des produits minéraux en solution.

En fait, les eaux naturelles contiennent toujours plus ou moins de MO qui se comportent, vis-à-vis des résines, de façon différente suivant leur nature. Certaines traversent intégralement le lit de résines, d'autres sont fixées de façon réversible et sont éliminées à la régénération, d'autres, enfin, sont fixées irréversiblement et tendent à empoisonner les résines.

En pratique, ce dernier inconvénient concerne surtout les échangeurs d'anions fortement basiques, les échangeurs de cations étant à peu près insensibles, et les échangeurs d'anions faiblement basiques fixant ces produits d'une façon relativement réversible.

Le plus souvent, les systèmes décrits plus haut permettent d'obtenir des résultats industriels satisfaisants, si l'on choisit judicieusement les résines. Cependant, on a constaté dans un certain nombre de cas, et en particulier lorsque les eaux brutes contiennent des composés humiques, que les combinaisons classiques de résines n'assuraient pas les résultats attendus.

Avec de telles eaux brutes, les échangeurs d'anions à grande porosité et à grand pouvoir adsorbant peuvent être utilisés, soit dans une chaîne classique comme échangeurs de finition, soit en tête de la chaire pour protéger les résines de déminéralisation proprement dites. Ces résines anioniques fixent directement les matières organiques et celles-ci sont éluées par traitement au chlorure de sodium ou à la soude caustique, ou mieux encore, par un mélange de sel et de soude.

Lorsqu'il s'agit d'eaux de surface, on a évidemment intérêt à faire précéder la déminéralisation d'une coagulation, d'une décantation et d'une filtration bien réglées, qui permettent souvent d'éliminer 50 à 90 % des MO solubles et colloïdales.

Après coagulation-filtration, un passage sur charbon actif en poudre peut aussi permettre une élimination poussée des acides humiques.

3.2. APPLICATIONS SPÉCIALES

Le traitement de l'eau n'est pas le seul domaine d'utilisation des échangeurs d'ions; ceux-ci constituent un moyen souvent pratique et efficace pour résoudre nombre de problèmes de génie chimique.

Les liquides à traiter sont des solutions aqueuses ou parfois organiques. Parmi les applications industrielles les plus courantes, on peut citer

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.1. Traitement de jus sucrés

- **Adoucissement :** il consiste à remplacer les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} par des ions Na^{+}, pour éviter l'entartrage des évaporateurs. Les réalisations sont nombreuses.
- **Déminéralisation partielle ou totale :** elle permet d'obtenir des sirops de sucre, de glucose, très purs. Appliquée aux moûts de raisin, elle est un procédé de fabrication de sucre de raisin liquide.
- **Décoloration:** elle peut être combinée à la déminéralisation grâce aux capacités d'adsorption de résines anioniques convenablement choisies.

Elle se pratique aussi directement sur résines adsorbantes (voir page 239).

- Substitution d'un ion par un autre :

remplacement des ions Na^{+} et K^{+} par des ions Mg^{2+} moins mélassigènes (Procédé QUENTIN).

3.2.2. Laiterie

- **Déminéralisation et décoloration** de lactosérums dilués ou concentrés.
- **Acidification de lait** par contact avec une résine cationique fortement acide, ce traitement entrant dans un procédé breveté de fabrication de la caséïne.
- **Désodation :** traitement destiné à fabriquer du lait de régime dans lequel les ions Na^{+} du lait sont remplacés en partie par des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} fixés sur la résine, celle-ci étant régénérée par un mélange de sels de calcium et de magnésium.

Figure 494. Installation de TIENEN (Belgique) pour la raffinerie tirlemontoise.
Débit: 30 m3.h^{-1}. Décoloration de sirop de sucre de betterave. Trois colonnes doubles.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2.3. Traitements d'effluents industriels

Ils sont effectués en vue de la récupération et/ou de la concentration de substances de valeur.

- **Stabilisation de bains d'acide chromique** de chromage en continu: ce traitement, en retenant le chrome trivalent et le fer sur une résine cationique fortement acide, permet de prolonger la durée d'utilisation du bain.
- **Traitement de bain chlorhydrique de décapage:** le bain se charge en fer qui en diminue l'activité. Le complexe ferrique se fixe sur une résine anionique fortement basique, sous forme de chlorure, permettant ainsi de prolonger la durée d'utilisation du bain. L'élution du complexe fixé sur la résine se fait à l'eau et produit une solution de chlorure ferrique commercialisable après concentration par évaporation.
- **Récupération de chrome hexavalent:** des eaux de rinçage, à faible teneur en bichromate de sodium, sont traitées sur une chaîne cation fort-anion faible. Les ions bichromate sont élués à la soude. Une partie de la solution de chromate alcalin ainsi obtenue est traitée sur une résine cationique forte. L'acide chromique ainsi récupéré est mélangé au restant de l'éluat alcalin pour redonner une solution de bichromate de sodium, réutilisable en fabrication. Ce procédé permet également de recycler des quantités importantes d'eau déminéralisée.
- **Récupération de cuivre et d'ammonium** à partir d'eaux résiduaires de fabrication de textiles synthétiques

Selon la nature des eaux, le traitement s'effectue sur résines cationiques faibles ou fortes, régénérées à l'acide sulfurique. Les solutions de sulfate de cuivre ou d'ammonium sont réutilisables en fabrication.

- **Récupération de nitrate d'ammonium**

à partir d'eaux résiduaires de fabrication d'engrais azotés; il s'agit, là encore, d'une concentration sur une chaîne cation fortanion faible (échangeurs UFD régénérés respectivement à l'acide nitrique et à l'ammoniaque). Le procédé est intéressant car il permet de récupérer de l'eau déminéralisée, de supprimer les pertes et surtout les rejets, sans consommation de réactifs puisque les éluats de régénération sont recyclés en fabrication après reconcentration éventuelle.

Il convient de préciser que les traitements biologiques de ces rejets ne permettent aucune récupération, produisent des boues et nécessitent l'apport de quantités importantes de nutriment carboné (méthanol par exemple), mais peuvent être adaptés aux cas des effluents trop dilués ou composés d'autres cations.

D'autres applications sont possibles, qui font appel à des techniques qui s'apparentent à celles utilisées en chromatographie. Ces techniques permettent de séparer

- plusieurs ions entre eux,
- un électrolyte d'un non-électrolyte,
- plusieurs non-électrolytes entre eux.

Ces séparations se font par déplacement, déplacement sélectif, élution, exclusion d'ions, etc. Elles sont utilisées essentiellement dans l'industrie pharmaceutique, mais demandent, avant mise en oeuvre, des études approfondies en laboratoire et en pilote.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

15
SÉPARATION PAR MEMBRANES

1. LES MODULES D'OSMOSE INVERSE (OI), D'ULTRAFILTRATION (UF) ET DE MICROFILTRATION (MF)

Les appareils unitaires de séparation appelés "modules" ou "cartouches"- mettant en oeuvre des membranes, sont conçus de façon à atteindre deux objectifs essentiels

- assurer, au niveau de la membrane, une circulation suffisante du liquide à traiter pour limiter les phénomènes de polarisation de concentration (01, UF) et de dépôts de particules (MF),
- réaliser un module compact, c'est-à-dire présentant un maximum de surface d'échange par unité de volume.

Ces deux objectifs tendent à diminuer le coût du module pour produire un volume donné de liquide traité, mais ils tendent aussi à augmenter le coût énergétique de la séparation: vitesse de circulation élevée et faible section de passage ayant pour conséquence une forte perte de charge. Un compromis est donc à trouver, mais le module doit satisfaire à d'autres exigences telles que

- facilité de nettoyage (décolmatage hydraulique ou chimique, stérilisation éventuelle),
- facilité de montage/démontage, etc.

Sur le marché, on trouve quatre grands types de modules: à plaques, spiraux, tubulaires, fibres creuses.

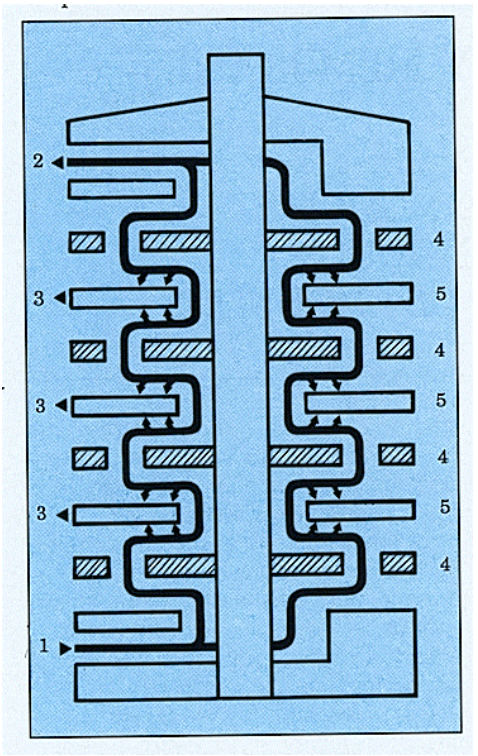
1.1. MODULES A PLAQUES

Ces modules sont constitués d'un empilement de membranes et de plaques-supports. Leur conception est dérivée de celle des filtres-presses (figure 495). Le fluide à traiter circule entre les membranes de deux plaques adjacentes. L'épaisseur de la lame liquide est de 0,5 à

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3 mm. Les plaques assurent, en même temps, le soutien mécanique de la membrane et le drainage du perméat. Leur agencement permet de réaliser des circulations en parallèle et/ou en série. Des ensembles unitaires allant jusqu'à 50 m^2 de surface peuvent être ainsi constitués.

Moyennement compacts, ces modules présentent l'avantage d'être facilement démontables, permettant ainsi le remplacement des membranes et, au besoin, un nettoyage complet. Du fait de la longueur et de la configuration tortueuse du canal de circulation, les pertes de charge sont relativement élevées.



1-Entrée d'eau brute.
2 - Sortie du concentrat.
3 - Sortie du perméat.
4-Plaque intermédiaire.
5-Ensemble membrane - plaque support membrane.
Figure 495. Exemple de module à plaques.

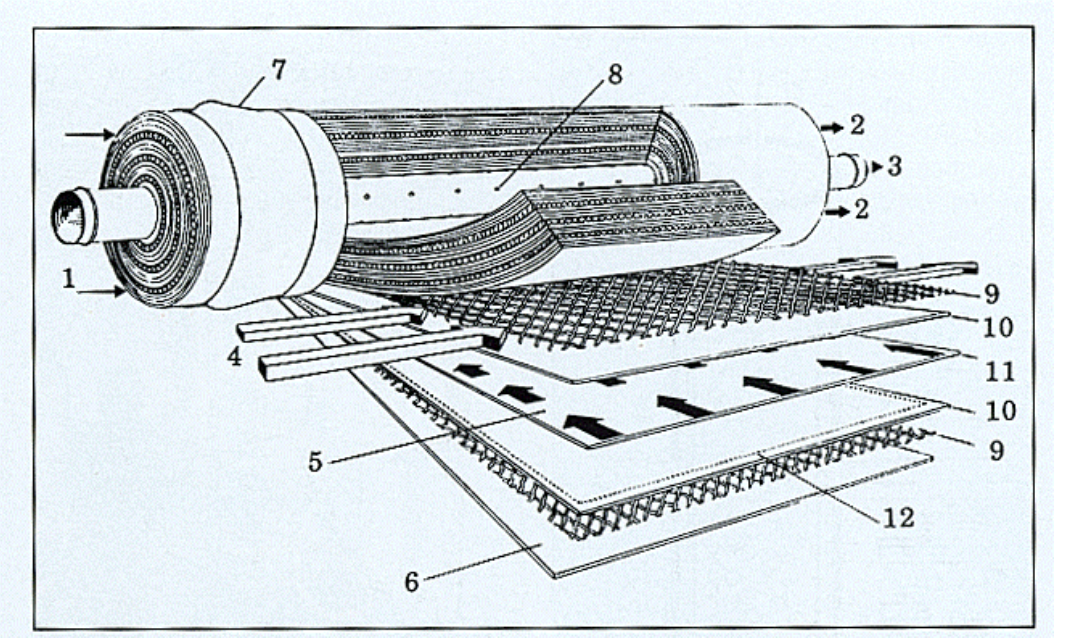
1.2.
MODULES SPIRAUX

(figure 496)

Une feuille poreuse souple (11) est placée entre deux membranes (10) planes. Le sandwich ainsi réalisé est scellé sur trois de ses bords (12). Le côté ouvert est scellé à un tube cylindrique collecteur (3) de part et d'autre d'une génératrice percée de trous. Plusieurs sandwichs sont ainsi fixés, séparés les uns des autres par un espaceur en plastique souple (9). Le fluide à traiter circule dans l'espaceur (9) ; la feuille poreuse (11) assure le drainage du perméat vers le collecteur axial (3).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. Les modules d'osmose inverse (OI), d'ultrafiltration (UF) et de microfiltration (MF)



1-Entrée d'eau.
2 - Sortie du concentrat.
3 -Sortie du perméat.
4 - Sens d'écoulement de l'eau brute.
5-Sens d'écoulement du perméat.
6 -Matériau de protection.
7-Joint d'étanchéité entre module et enveloppe
8-Perforations collectant le perméat.
9 -Espaceur.
10 -Membrane.
11- Collecteur de perméat.
12-Ligne de soudure des deux membranes.

Figure 496. Module à enroulement spiral.

Le diamètre d'un élément peut aller jus qu'à 30 cm et sa longueur jusqu'à 1,5 m Plusieurs éléments (2 à 6) peuvent être mis en série dans un même carter cylindrique Beaucoup plus compact et offrant moins de perte de charge que le module à plaques, il est par contre plus sensible à l'encrassement, l'écoulement dans l'espaceur ne pouvant être réalisé à grande vitesse.

1.3. MODULES TUBULAIRES

Les membranes sont placées ou formées à l'intérieur d'un tube support, poreux ou percé de trous de drainage, et de diamètre variant de 10 à 40 mm. Ces tubes sont ensuite placés en parallèle ou en série dans une enveloppe cylindrique pour constituer le module unitaire (figure 497).

L'hydrodynamique de l'écoulement est parfaitement définie et des vitesses de circulation pouvant atteindre 6 $m.s^{-1}$ sont possibles si un régime de forte turbulence est nécessaire. Ces modules ne nécessitent pas de préfiltration fine du liquide à

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

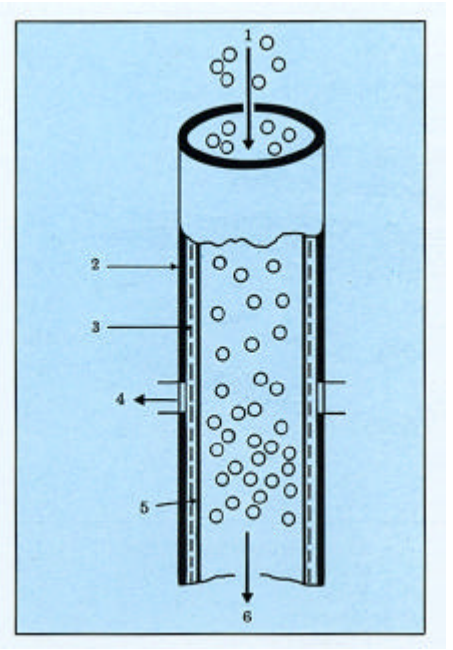


Figure 497. Module tubulaire.

Figure 498. Installation de SAN ANDRES (Colombie). Débit: 3 000 $m^3 j^{-1}$. Production d'eau potable, a partir d'eau de puits côtiers. Ensemble de modules fibres creuses.

traiter et sont faciles à nettoyer. Ils sont particulièrement bien adaptés au traitement des fluides chargés très visqueux.

Leur inconvénient majeur est leur faible compacité et un prix de revient élevé par m^2 installé

1.4. MODULES FIBRES CREUSES

Les fibres creuses sont produites par extrusion au travers de filières annulaires. D'un diamètre variant entre quelques dizaines de microns et quelques millimètres, elles sont dites "autosupportées" puis - qu'elles peuvent résister à des pressions internes ou externes importantes. Ces fibres sont ensuite regroupées en un faisceau de plusieurs milliers, voire millions.

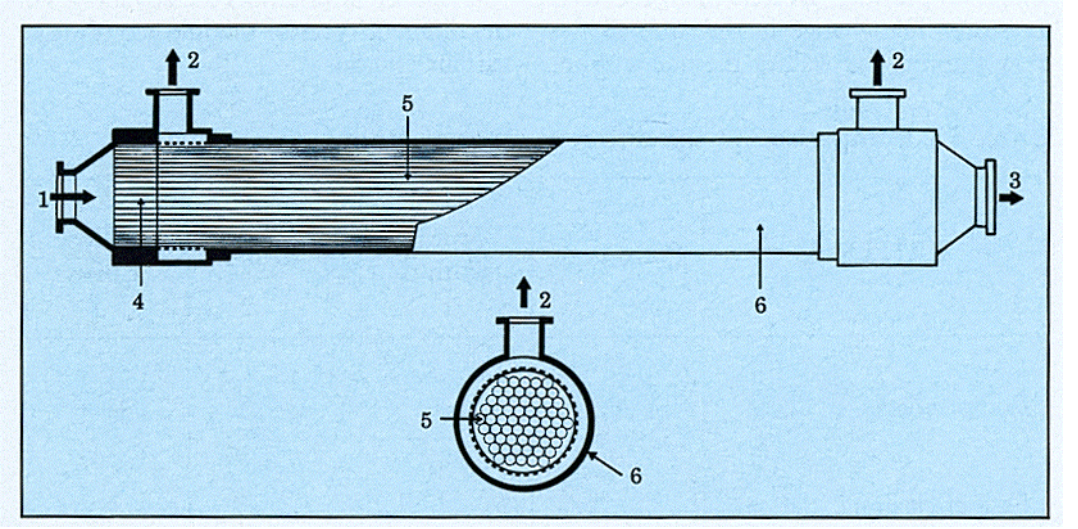
L'écoulement du liquide à traiter s'effectue, soit à l'intérieur des fibres (peau interne) soit à l'extérieur (peau externe). Dans le premier cas, l'étanchéité entre les écoulements internes et externes est

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

réalisée par un "empotage" à l'aide de résine. Après durcissement, l'ensemble est sectionné de sorte qu'apparaissent les extrémités ouvertes de toutes les fibres (figure 499).

Dans le second cas, le faisceau est souvent disposé en U (figure 499 bis).

Le rapport surface d'échange/volume étant inversement proportionnel au diamètre, la compacité atteint des valeurs très élevées (plusieurs milliers de m^2 par m^3).



1- Entrée d'eau brute
2- Sortie du perméat
3- Sortie du concrentrat
4- Résine d'empotage
5- Fibres creuses
6- Carter

Figure 499. Module à fibres creuses à peau interne: faisceau droit.

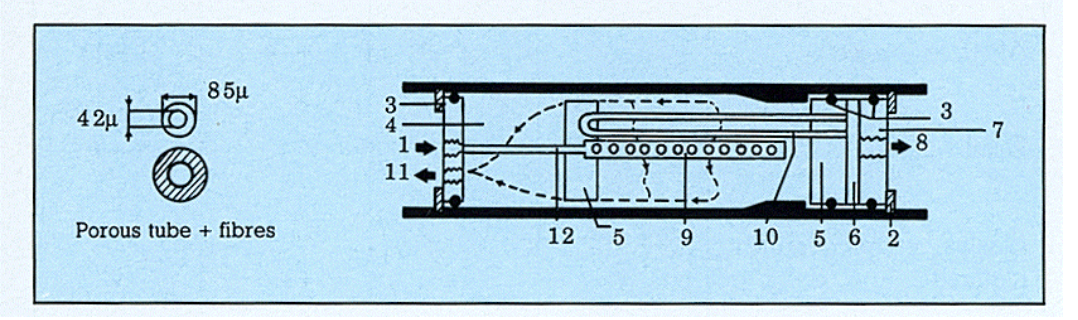


Figure 499 bis. Module à fibres creuses à peau externe: faisceau en U type Permasep B9

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Un autre avantage, exploité en UF et MF, de la géométrie des fibres creuses est la possibilité d'assurer des lavages par inversion des pressions. Ces rétrolavages sont en général effectués en placant le perméat sous une pression supérieure à celle de l'alimentation. Le changement de sens de l'écoulement au travers de la paroi de la fibre creuse permet de décoller le gâteau de particules déposé en surface (figure 500). Celui-ci est alors transporté hors du module par le débit de balayage normal du module.

Le tableau 77 résume l'intérêt des différents types de module suivant différents critères.

Tableau 77. Comparaison des différents types de module.

CRITÈRES	A plaques	Spiraux	Tubulaires	Fibres creuses
Compacité	+	++	-	+++
Facilité nettoyage				
- in situ	+	-	++	-
- par rétrolavage	-	-	- (2)	++
Coût du module	+	+++	-	+++
?P (entrée - rejet)	-	++	+++	++ (1)
Volume mort	+	+	-	+++
Finesse du prétraitement nécessaire	+	-	+++	-

- net désavantage +++ net avantage

(1) Très variable suivant l'agencement interne des modules et du diamètre des fibres.

(2) A l'exception de certains modules céramiques où la couche formant membrane est liée chimiquement à son support.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

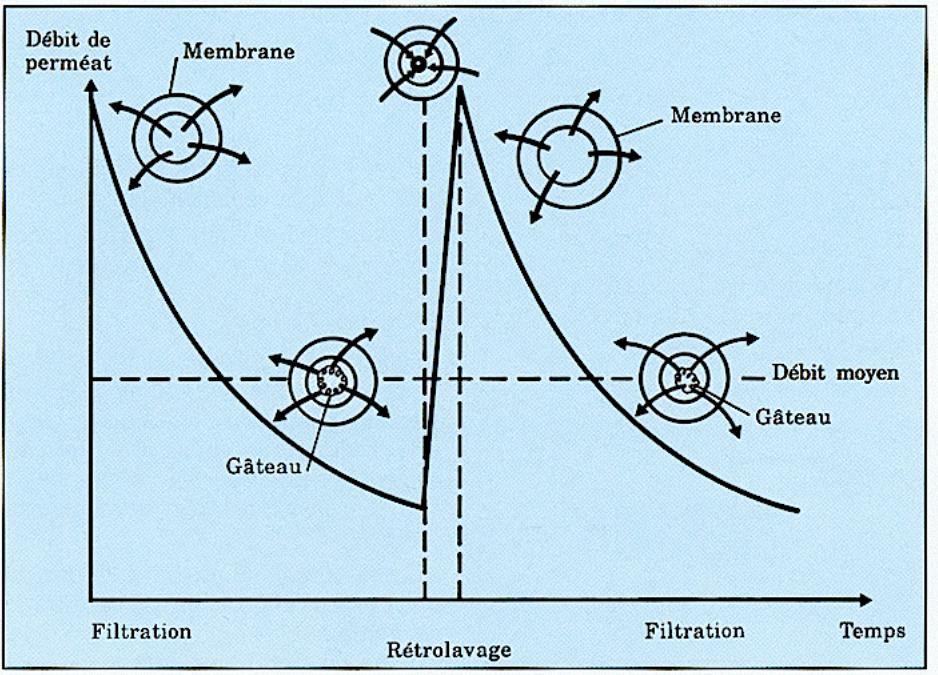


Figure 500. Principe du rétrolavage.

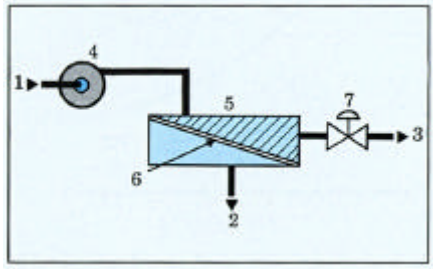
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. LES DIFFÉRENTS TYPES D'AGENCEMENT

2.1 PRINCIPE

Le principe de la mise en oeuvre d'un module est schématisé sur la figure 5O1.



1-Eau brute.

2-Eau épurée.

3 -Rejet concentré.

4-Pompe haute pression.

5-Module.

6 -Membrane semi-perméable.

7-Vanne de détente.

Figure 501. Schéma simplifié de fonctionnement d'une unité d'osmose ou de filtration tangentielle

Une pompe (4) assure la mise sous pression de l'alimentation (1) et la circulation le long de la membrane. Le perméat est soutiré en (2) et une vanne (7) est placée sur la canalisation de rejet (3) pour maintenir la pression dite de "rejet" à l'intérieur du module.

Le choix de la pompe ainsi que le réglage de la vanne (7) permettent de fixer indépendamment la **pression d'alimentation et le taux de conversion Y** qui est le rapport entre le débit de perméat et le débit d'alimentation.

Pour un module donné, il y a tout intérêt à travailler à fort taux de conversion, ceci limite en effet l'énergie consommée par la circulation du rejet

Cependant, si Y est très élevé, le facteur de concentration dans le module peut atteindre des valeurs telles que

- le produit de solubilité des différents composés soit dépassé,
- la suspension à traiter devienne trop chargée.

Un entartrage se produira en osmose inverse, un gel protéique apparaîtra en ultrafiltration, un blocage progressif des canaux de circulation interviendra en microfiltration.

Comme indiqué au chapitre 3, souschapitre 9, seule une vitesse tangentielle importante permet de limiter ces phénomènes de polarisation (01, UF) ou d'épaisseur du gâteau de filtration (MF) et donc de maintenir la production d'un module à une valeur élevée ce qui, sur un seul module, conduit à choisir un Y faible.

Ces considérations font que les taux de conversion varient selon le type de module et le type de procédé. Le tableau ci-après résume les taux de conversion généralement retenus par élément de module et fait apparaître la nécessité d'associer plusieurs de ces éléments en série pour obtenir des conversions raisonnables (sauf, à la rigueur, pour les systèmes osmose "fibres creuses").

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Conversion usuelle par élément de module (Y en %)				
	Plaques (par plaque)	**Fibres creuses**	**Spiraux** (par cartouche)	**Tubulaires** (par tube)
OI	5-15	30-60	10-25	0,2-2
UF	1-5	5-10(1) 100 (2)	2-10	0,5-5
MF	1 - 6	5 - 15 (1) 100 (2)	-	0,5 - 5

(1) Système en filtration tangentielle. (2) Système en mode frontal (cycle de filtration).

2.2. RÉALISATIONS INDUSTRIELLES

Les unités industrielles à membranes sont constituées de la juxtaposition de modules élémentaires en série/parallèle et fonctionnent selon différents modes. On peut ainsi trouver des systèmes allant du mono-étagé discontinu au continu multi-étagé.

2.2.1. Régime discontinu en boucle ouverte

Le système comprend une cuve d'alimentation, une pompe de recirculation et un ensemble de modules (figure 502). Une vanne placée sur la canalisation de rejet fixe la pression transmembranaire.

Au fur et à mesure que le perméat est extrait, la concentration dans la cuve augmente mais le débit de perméat Q_p décroît (figure 503). Un des inconvénients de ce système est la forte dépense énergétique, puisque seule une faible partie du liquide mis sous pression, puis en circulation, traverse la membrane. Cependant, il est en général retenu pour les applications où les volumes à traiter sont faibles, le coût d'investissement étant inférieur aux autres modes de fonctionnement: exemple typique: traitements d'huiles solubles à faible débit (< 200 $l.j^{-1}$ par UF).

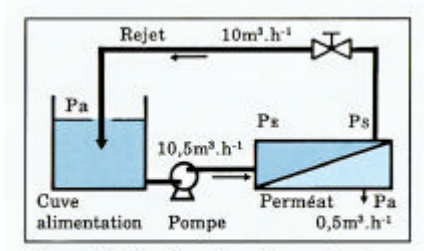


Figure 502. Système discontinu en boucle ouverte.

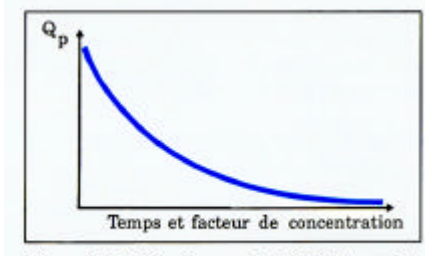


Figure 503. Décroissance du débit de perméat.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.2. Régime discontinu en boucle fermée

Afin de réduire la dépense énergétique, il peut être intéressant de modifier le système précédent en plaçant une pompe de gavage entre le bac et la pompe de recirculation (figure 504).

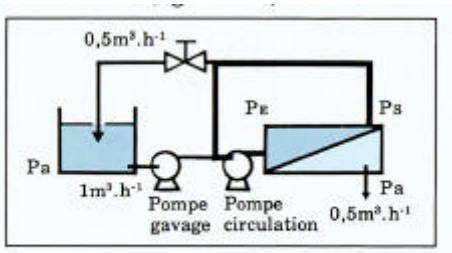


Figure 504. Système discontinu en boucle fermée.

Le gain énergétique par rapport au système à boucle ouverte est d'autant plus important que la pression de sortie Ps est élevée. Par exemple, en prenant compte des débits indiqués sur les figures 502 et 504, les puissances en jeu pour la circulation sont, en première approximation

W_o (boucle ouverte) = K.10 (Pe - Pa)

W_f (boucle fermée) = K.10 (Pe - Ps)

soit $W_o - W_f$ = K.10 (Ps - Pa)

alors que la puissance nécessaire à la perméation est la même dans les deux cas

$$K.0{,}5\,\frac{Pe - Ps}{2} - Pa$$

Ceci explique, que pour la même application qu'en 2.2.1, on choisisse ce système lorsque les débits à traiter sont supérieurs à 200 $l.j^{-1}$.

2.2.3. Régime servi-continu en boucle fermée

Le système précédent peut encore être utilisé lorsque le fluide à traiter est produit en continu (figure 505). Une fois le réservoir rempli, celui-ci continue à recevoir le liquide d'alimentation à un débit égal au débit de perméat. L'avantage réside dans la diminution de volume de la cuve d'alimentation. Cependant, la concentration augmentant progres-sivement, le débit de perméat diminue au cours du temps. Des régulations sont alors à prévoir sur le débit d'alimentation de la cuve ou sur la pression transmembranaire, pour maintenir équilibré le bilan matière global du système.

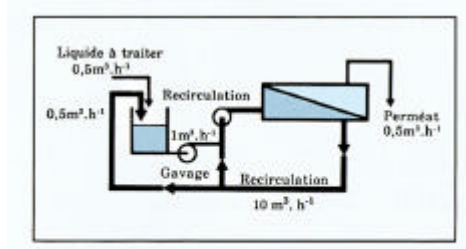


Figure 505. Système semi-continu en boucle fermée.

Un tel système est utilisé par exemple en UF pour la récupération des pigments et résines sur les eaux de rinçage de carrosseries peintes par électrophorèse.

2.2.4. Régime continu mono-étagé

Le système est similaire au précédent à l'exception de la ligne rejet. Le concentrat est en effet soutiré en continu; la vanne V contrôle le taux de conversion qui, dans le cas de la figure 506 est de 90 %.

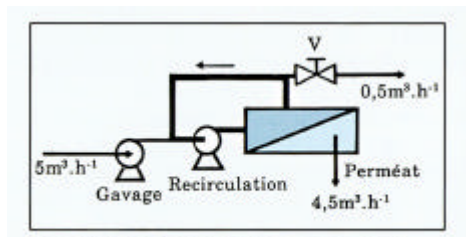


Figure 506. Système continu mono-étagé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'inconvénient ici est de fonctionner avec une forte concentration dans la boucle et donc à faible débit de perméat. Ce système est cependant en général retenu pour les unités de clarification d'eau par ultra ou microfiltration. Pour ces applications, le débit de perméation est en effet peu sensible au facteur de concentration de la boucle. Au contraire, pour les applications où l'on observe une forte décroissance de débit de perméat avec le facteur de concentration, une installation multiétagée est envisagée.

2.2.5. Régime continu multi-étagé

- **Montage série-rejet sans recirculation**

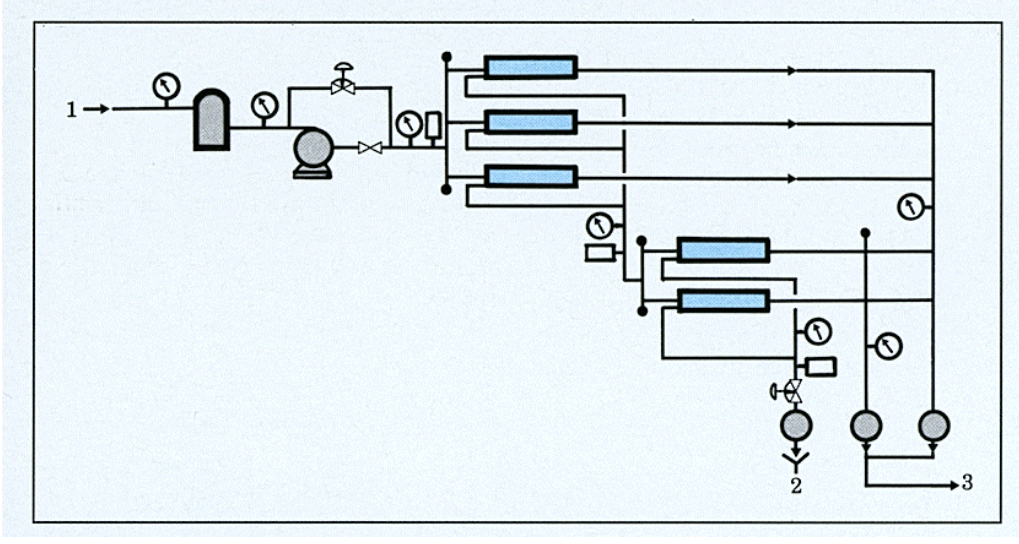
Ce type de montage est en général retenu pour le dessalement d'eau saumâtre.

La pression moyenne de fonctionnement étant très supérieure à la perte de charge au travers du module, il est intéressant de faire fonctionner les étages modules en série-rejet (figure 507). Chaque étage étant alimenté par le rejet du précédent, deux ou trois étages sont, en pratique, suffisants pour obtenir la conversion recherchée tout en gardant un bon balayage des modules. Dans ce montage, seul le dernier étage fonctionne à une concentration élevée, le flux moyen par module est donc supérieur à une installation fonctionnant à conversion égale en un seul étage, les modules étant tous en parallèle.

- **Montage série-rejet avec recirculation**

En ultrafiltration, la pression transmembranaire utilisée n'est que faiblement supérieure à la perte de charge du module; le montage série-rejet nécessite des pompes de recirculation sur chacun des étages pour augmenter les vitesses tangentielles et vaincre les pertes de charge des modules (figure 508).

Comme précédemment, l'avantage est ici de travailler à des taux de concentration plus faibles dans le ou les premiers étages.



1 - Eau brute. 2 - Rejet. 3 - Eau produite.

Figure 50 7. Montage série-rejet sans recirculation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

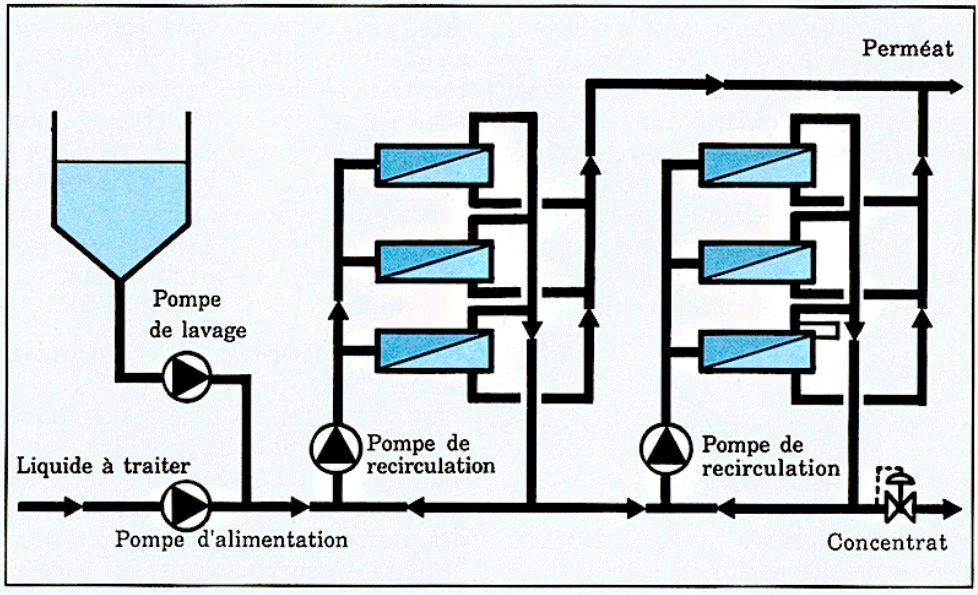


Figure 508. Montage série rejet avec recirculation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. CLARIFICATION ET DÉSINFECTION DES EAUX

La production d'eau potable, mais aussi de nombreuses eaux de fabrication, à partir d'eaux naturelles, suppose toujours l'élimination des particules en suspension, quelle qu'en soit l'origine ou la nature. Ceci s'apprécie en particulier en termes d'élimination de la turbidité (clarification...) et de désinfection.

Comme vu au chapitre 3, on peut, avec des membranes de microfiltration ou d'ultrafiltration à haut seuil de coupure, assurer, en une seule étape, l'ensemble des opérations classiques de clarification et filtration. Ces membranes constituent par ailleurs une barrière à la pollution bactérienne, voire virale, suivant leur seuil de coupure (voir page 250) et ceci sans réactif, c'est-à-dire sans contribuer à la génération de "boues".

Une solution économique, développée à l'initiative de la LE, a été mise au point en utilisant des modules fibres creuses à peau interne, tels que ceux décrits p.826, assemblés dans un système mono-étagé continu (figure 512).

Pour la plupart des applications et avec l'agencement des modules présentés ci-dessous, DEGRÉMONT a choisi, pour assurer un taux de conversion élevé, de maintenir la ligne de rejet fermée, le débit

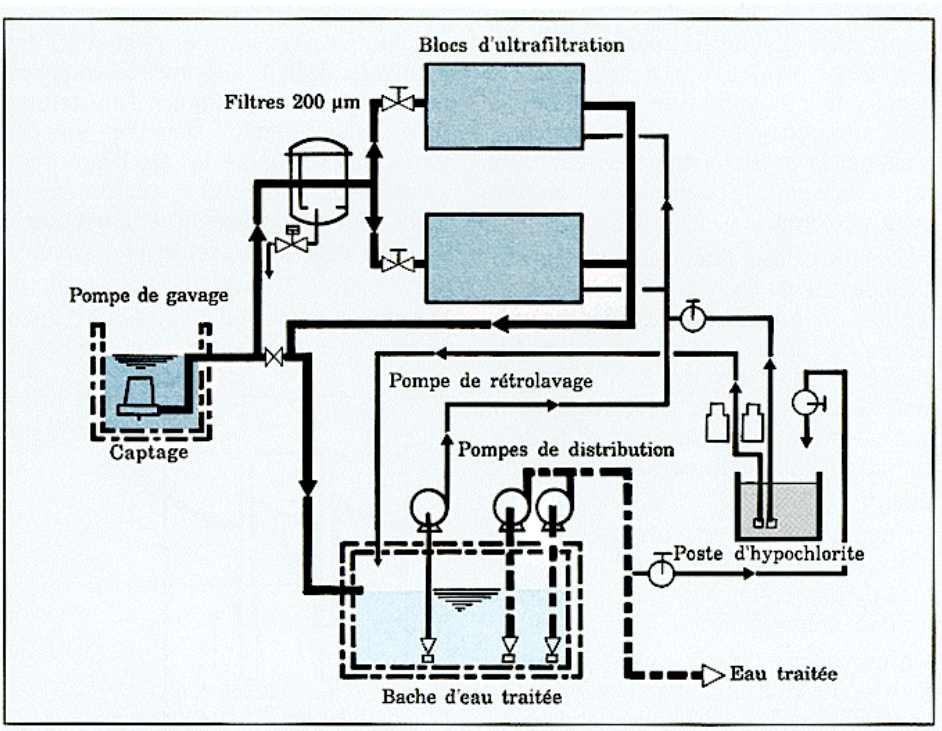


Figure 512 a. Installation de DOUCHY (Loiret). Débit : 50 $m^3.h^{-1}$. Production d'eau potable à partir d'une eau souterraine. Schéma de principe de l'installation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

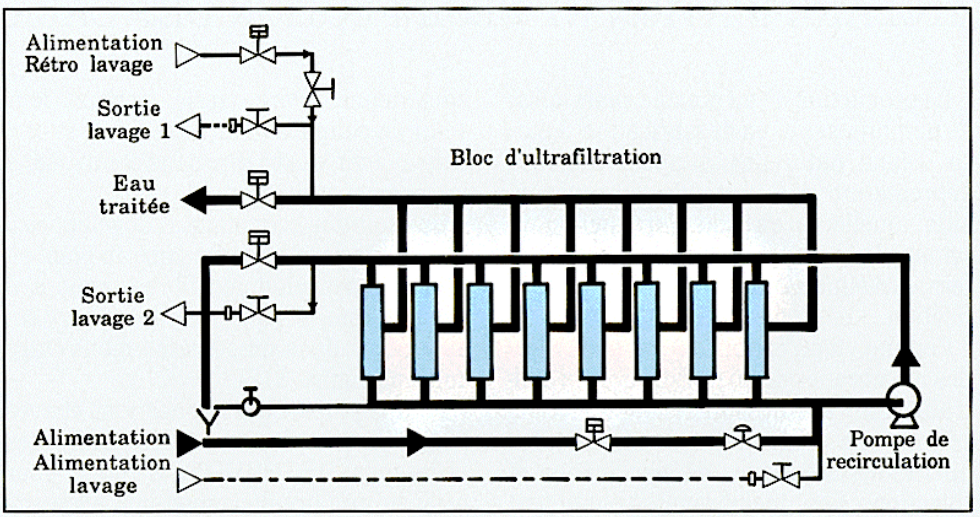


Figure 512 b. Installation de DOUCHY. Schéma de principe du bloc UF.

de perméat est donc fixé par la valeur du débit de gavage. Au fur et à mesure que la boucle de circulation se concentre, la résistance du gâteau de filtration augmente et la pression transmembranaire nécessaire pour produire le débit de perméat fixé croît.

Lorsque celle-ci atteint une valeur affichée, la pompe de recirculation est arrêtée, la pompe de rétrolavage placée sur la ligne de perméat est mise en route et la vanne de rejet ouverte. L'inversion de sens des écoulements au travers de la paroi des fibres creuses permet de déloger puis d'éliminer le gâteau de particules (figure 513).

L'opération de rétrolavage est très brève (ex. 30 s toutes les 60 min) et les taux de conversion sont donc supérieurs à 90 %, voire 95 %.

Ainsi conçu, le système est facile à automatiser. Le taux de conversion dépend de la fréquence des rétrolavages nécessaires pour maintenir le débit fixé. La qualité de l'eau produite est indépendante de la qualité de l'eau brute; c'est là un des avantages décisifs des procédés membranaires de ne pas demander d'ajustement de réactifs (coagulant, floculant) lors des variations de qualité de l'eau brute. Cette sûreté de traitement du système membranaire est particulièrement intéressante pour les installations petites et moyennes.

La figure 514 donne les résultats, sur plusieurs mois, d'un système à membranes de microfiltration type LE.

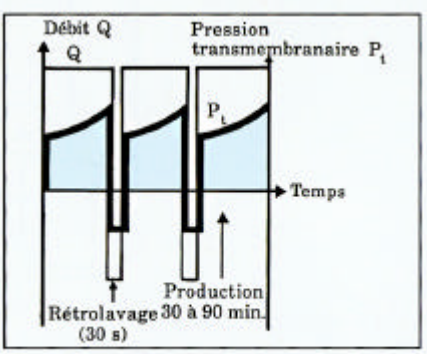


Figure 513. Séquence de rétrolavage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

comparés à ceux de la station préexistante équipée d'une floculation sur filtre.

Dans certains cas, le système précédent peut être modifié pour fonctionner sans pompe de recirculation. On utilise alors des fibres creuses à peau externe fonctionnant en "filtration frontale". L'eau brute est mise sous pression à l'extérieur du faisceau des fibres, l'eau potable étant récupérée à l'intérieur des fibres.

Le "gâteau" accumulé à l'extérieur de la fibre est éliminé régulièrement par rétrolavages très fréquents (par exemple, toutes les 5 à 30 min). Ce système, plus économique en énergie et investissement

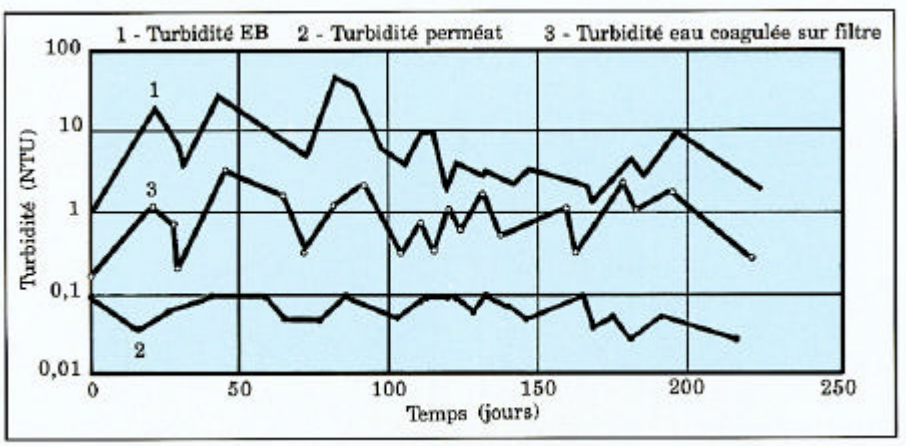
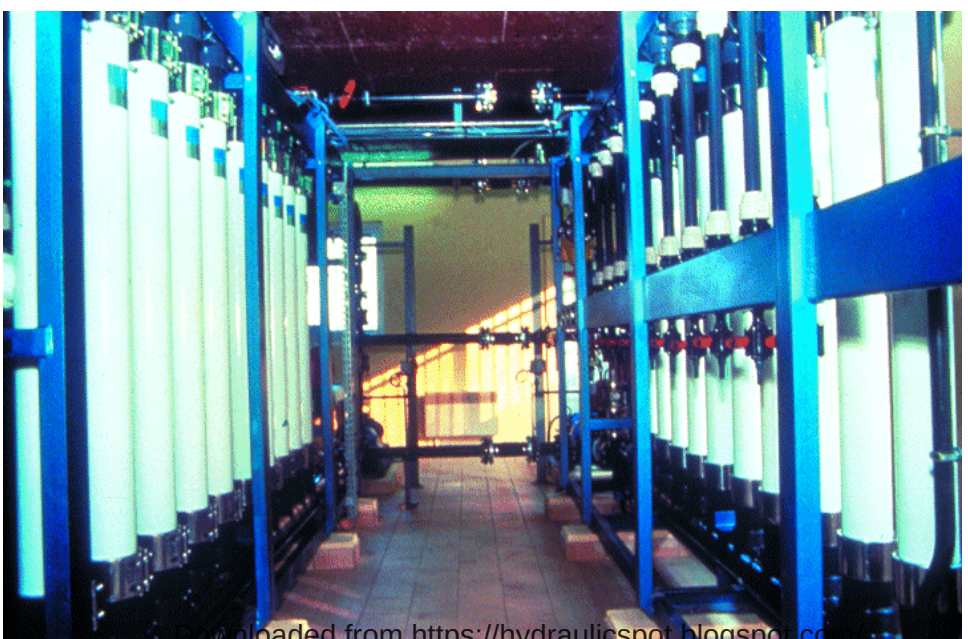


Figure 514. Comparaison coagulation sur filtre et membranes LE.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 515. Installation d'AMONCOURT (Haute-Saône). Débit. 10 $m^3.h^{-1}$. Production d'eau potable par UF à partir d'eau souterraine.

(absence de boucle de recirculation), entraîne toutefois une perte d'eau plus élevée si les eaux brutes sont chargées.

Sur le même principe, on peut clarifier les eaux de piscines, les eaux saumâtres ou de mer avant passage sur des modules d'osmose, l'eau destinée à la réinjection pour la production assistée du pétrole, les eaux de fabrication utilisées par exemple dans l'industrie des boissons ou l'industrie pharmaceutique.

Dans toutes ces applications, les membranes constituent également une barrière absolue pour les micro-organismes. C'est souvent un avantage décisif par rapport aux autres procédés de clarification.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. EAU ULTRA-PURE

5.1 INDUSTRIE ÉLECTRONIQUE

L'industrie des semi-conducteurs nécessite depuis longtemps de l'eau très pure chimiquement, physiquement et biologiquement; cependant, la miniaturisation très poussée des composants et circuits intégrés a provoqué des exigences de plus en plus draconiennes sur la qualité de l'eau ultra pure.

Au chapitre 2, page 71, les recommandations ASPEC sont rappelées. Elles sont proches des recommandations américaines (ASTM) ou japonaises qui sont prévues pour des composants atteignant des capacités de mémoire de 4 Mbit.

La partie chimique de ces garanties a peu évolué (18 MO.cm à 25°C étant très proche de la limite théorique).La garantie de 5 $\mu g l^{-1}$ SiO_2 est usuelle.

Les caractéristiques physiques et biologiques à respecter sont, par contre, devenues beaucoup plus sévères

- le COT doit être abaissé à 50 $\mu g.l^{-1}$ et même à 20 $Ng.l^{-1}$ (au lieu de 500 $\mu g.l^{-1}$ auparavant),
- le nombre de bactéries doit être inférieur à 10 par litre,
- les tailles de particules prises en compte sont passées de 0,5 µm à 0,1 µm, voire 0,05 µm,
- enfin, apparaissent, dans certains cas, des exigences relatives à l'oxygène dissous (O_2 < 0,1 $mg.l^{-1}$, voire 0,05).

5.1.1. Les diverses techniques utilisées

La figure 516 montre un exemple de chaîne de traitement assez typique où l'emploi de membranes, combiné à d'autres traitements plus classiques, donne une fiabilité exceptionnelle au système, même avec des eaux brutes jamais parfaitement connues (surtout la nature de leurs matières organiques et de leurs particules).

5.1.1.1. Pollution minérale dissoute

Elle est éliminée principalement par deux moyens:

- (osmose inverse (souvent basse pression) qui retient environ 90 à 95% de la salinité entrante et soulage considérablement les échangeurs d'ions situés en aval,
- l'échange d'ions: suivant l'importance de la salinité résiduelle de l'eau osmosée, l'installation de déminéralisation sur résines comporte une chaîne primaire (cation fort et anion fort) suivie d'un échangeur de finition à lits mélangés, ou directement un échangeur à lits mélangés afin d'obtenir une résistivité supérieure à 14 MO.cm. De plus, un autre échangeur à lits mélangés est placé en polissage sur le circuit de la boucle pour obtenir les 18 MO.cm recherchés.

- **Réactifs de régénération**

En raison de la qualité de l'eau demandée, il est indispensable de ne pas introduire d'impuretés par les réactifs de régénération. Ceux-ci (H_2SO_4, HCl et NaOH) doivent être de grande qualité.

- **Résines pour lits mélangés**

Le bon fonctionnement d'un lit mélangé repose en grande partie sur l'efficacité de sa régénération et celle-ci est fonction de la bonne séparation des résines. En effet,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

on sait qu'une séparation insuffisante; des résines amène des fuites ioniques intolérables ici (cross contamination, voir page 1355). Dans ce domaine, plusieurs améliorations sont proposées:

- utilisation de lits tricouches,
- développement des résines appelées "monosphères" dont la granulométrie est extrêmement resserrée et permet un excellent reclassement,
- utilisation en polissage de résines non régénérables, de "qualité électronique", spécialement traitées et rincées pour obtenir une très haute résistivité et un faible COT. Ces résines, relativement coûteuses en exploitation, présentent toutefois deux avantages importants - aucun risque de contamination des circuits et des résines par les réactifs de régénération,
- simplicité des équipements mis en oeuvre

5.1.1.2. Pollutions particulaire, organique et bactériologique

Ces pollutions, qui ne sont pas indépendantes, sont mesurées par le nombre de particules et leurs tailles, le nombre de bactéries, le COT.

On peut classer en deux groupes les techniques mises en jeu pour les traiter

- les procédés de désinfection/oxydation qui détruisent les bactéries et oxydent plus ou moins totalement les particules organiques,
- les procédés membranaires qui éliminent les pollutions particulaire et organique.

- **Désinfection**

Le **chlore** et ses dérivés peuvent être utilisés, mais seulement dans le prétraitement. Très efficaces, ils présentent l'inconvénient d'augmenter la salinité en introduisant des ions chlorures ainsi que des composés dérivés (haloformes).

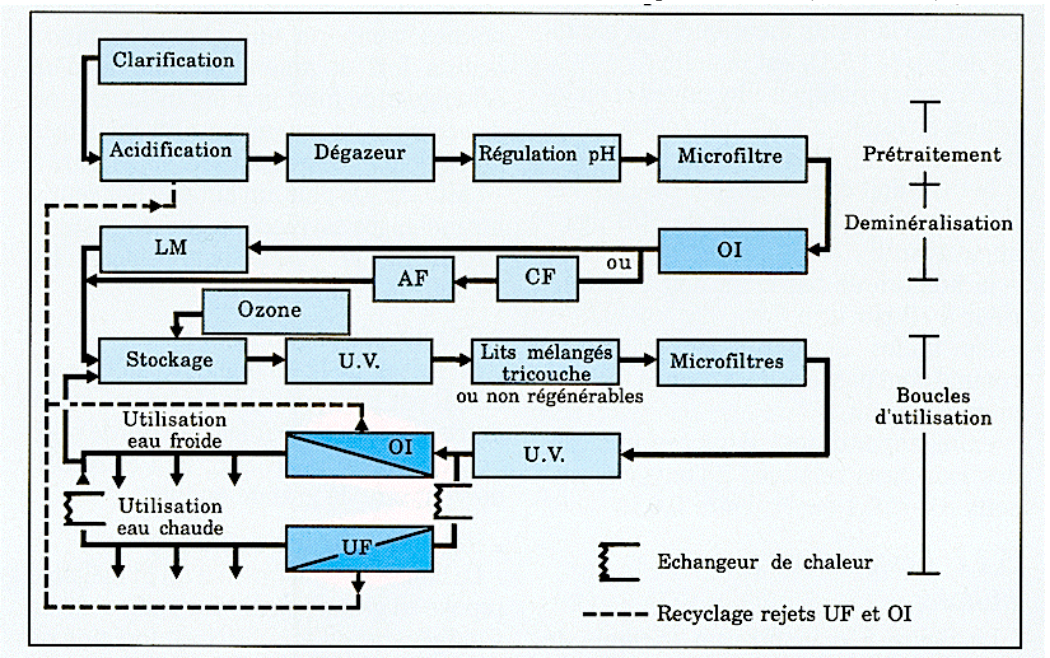


Figure 516. Chaîne de traitement pour l'industrie électronique

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'ozone est un oxydant plus puissant que le chlore et n'introduit pas d'ions supplémentaires; par contre, en dose insuffisante, il peut aussi donner naissance à des produits de dégradation pyrogènes (substances capables de déclencher une élévation thermique après injection). La tendance actuelle est de disposer le stockage d'eau d'appoint en fin de chaîne de traitement. Il est placé sous gaz inerte si la capacité est inférieure à 2 heures; au-delà, une désinfection continue de ce stockage est de plus en plus souvent envisagée, avec une teneur en O_3 résiduel d'environ 5 $mg.l^{-1}$.

Les UV sont utilisés seuls ou associés à l'ozone. On rencontre généralement sur les installations un ou deux postes disposés de la façon suivante

- le premier, pour détruire les dernières bactéries et l'ozone résiduel éventuellement présent. Les lits mélangés ainsi protégés fixent le CO_2 et les composés issus de la destruction des bactéries (S, P, Na, etc.),
- le deuxième, placé en sécurité avant la filtration finale: ces appareils produisent alors une petite quantité de CO_2 qui, n'étant plus arrêtée, peut abaisser légèrement la résistivité finale.

- **Procédés membranaires**

La figure (page 210) fixe les domaines d'application des trois techniques principales: microfiltration, ultrafiltration et osmose inverse.

La **microfiltration** est ici principalement utilisée

- comme sécurité en amont de l'osmose inverse du traitement de l'eau d'appoint, - en aval des échangeurs d'ions, pour retenir d'éventuelles fines de résines,
- aux points d'utilisation pour retenir bactéries (reviviscence toujours possible en réseau) et particules.

L'ultrafiltration est utilisée sur la boucle de production, en fin de traitement, de façon à arrêter les virus, macromolécules (dont les pyrogènes) et particules. Elle est surtout utilisée lorsque les rinçages sont faits à chaud (60 à 85°C), les membranes UF résistant mieux que les membranes OI aux températures élevées.

L'osmose inverse (basse pression) est utilisée presque systématiquement sur l'eau d'appoint pour soulager la chaîne de déminéralisation, mais surtout comme barrière presque absolue aux pollutions organiques diverses. Avec les nouvelles exigences de qualité d'eau, il est de plus en plus courant d'utiliser également l'OI sur la boucle de production, en lieu et place de l'UF ou de la MF, afin de réduire le plus possible la pollution organique dissoute (COT). Suivant le type de membrane et la nature des composés organiques, on peut ainsi espérer éliminer à ce dernier stade de 50 à 80 % du COT présent.

5.1.2. Méthodes de mesure

La mesure des traces résiduelles de pollution est devenue beaucoup plus délicate que celle des ions résiduels.

Il existe, depuis quelques années, des COT-mètres permettant une mesure continue avec une précision suffisante pour l'eau ultra-pure (voir page 340).

Le contrôle des particules est assuré par des compteurs optiques à laser qui donnent une numération continue et précise.

Les contrôles bactériologiques se font par numération sur membrane 0,45 µm, après incubation pendant 24 ou 48h, par épifluorescence qui donne une évaluation plus rapide.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.1.3. Remarques sur la conception et la réalisation des installations

Il est nécessaire de prendre un certain nombre de précautions pour la conception générale des circuits, en particulier - éviter, au maximum, toutes les zones mortes (vannes, coudes, piquages de mesure, circuits de dérivation, branches de tuyauterie à l'arrêt, "dead ends"). Il faut maintenir une vitesse minimale dans tous les circuits, en-dessous de laquelle se créeraient des zones mortes, favorables à la reviviscence bactérienne. Ceci justifie l'organisation de boucles dans tous les circuits,

- éviter ou réduire les stockages,

- prévoir, à l'aval immédiat d'une unité, l'arrêt de la pollution parasite qu'elle peut occasionner, ex.: filtration de fines de résine à l'aval d'un échangeur d'ions,

- en raison de la corrosivité de l'eau ultra-pure, choisir soigneusement les matériaux en contact avec elle, pour ne pas relarguer de sous-produits. L'utilisation de PVC tend à régresser au profit de matériaux plus "nobles" tels que l'ABS et le PVDF

.

Figure 517. Installation de CORBEIL (Essonne) pour IBM. Production d'eau ultra pure par OI. 4 lignes de traitement comprenant chacune 3 étapes de modules (5 + 2 + 1) de débit unitaire 47 $m^3.h^{-1}$

.

5.2 INDUSTRIES PHARMACEUTIQUES

Si les besoins quantitatifs sont en général plus modestes dans les industries pharmaceutiques, les exigences en matière de qualité sont comparables à celles de l'électronique.

On y retrouve donc, très largement répandus, les procédés de production d'eau ultra pure avec notamment les distributions en boucle et les techniques membranaires précédemment évoquées.

Pour la préparation d"injectable" (eau apyrogène), on peut noter qu'en France la pharmacopée impose encore une bi-distillation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. AUTRES APPLICATIONS DES MEMBRANES EN TRAITEMENT DES EAUX

6.1. TRAITEMENT RECYCLAGE ERU

En l'absence de ressources de meilleure qualité, les eaux résiduaires urbaines ont l'avantage d'être disponibles sur le site de l'agglomération à un coût nul. Aussi, de plus en plus fréquemment, on envisage une réutilisation de celles-ci pour des usages "nobles" tels que

- usages industriels exigeants ex. chaudières MP et HP, eaux de procédés (figure 518),
- recyclage en milieu urbain avec risque d'ingestion par l'homme (ex. parcs de loisirs, réalimentation de nappe, réutilisation interne en immeuble).

Dans ces cas, l'emploi de système d'OI, en général basse pression, (ou d'UF si l'élimination de salinité n'a pas d'intérêt), permet d'obtenir une fiabilité supérieure à celle des systèmes "classiques", en particulier pour l'élimination des MO réfractaires et des pathogènes.

Ces traitements, encore exceptionnels, sont très compétitifs par rapport au dessalement d'eau de mer, lorsqu'ils sont appliqués sur une eau ayant subi un bon traitement biologique.

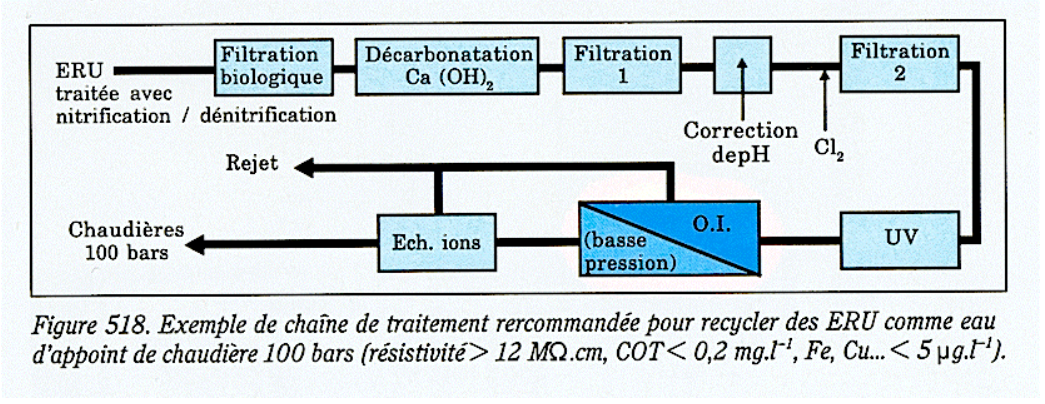


Figure 518. Exemple de chaîne de traitement rercommandée pour recycler des ERU comme eau d'appoint de chaudière 100 bars (résistivité > 12 MΩ.cm, COT < 0,2 mg.l^{-1}, Fe, Cu... < 5 µg.l^{-1}).

6.2. TRAITEMENT DES EFFLUENTS INDUSTRIELS

Compte tenu de leur aptitude à séparer différents solutés (ionisés ou non), et des particules de toutes tailles, les membranes peuvent résoudre a priori tous les problèmes de traitement d'effluents.

Seule la prise en compte de paramètres économiques (investissement, énergie, coût de remplacement des membranes) et le fait que le taux de concentration reste limité (pression osmotique, viscosité,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

entartrage), font que l'on n'envisage aujourd'hui ces techniques que dans les cas suivants - récupération d'une eau de bonne qualité pour réutilisation locale (§ précédent),

- valorisation du concentré.

Dans ce cas, il est nécessaire de récupérer l'effluent au voisinage immédiat de l'émission: on peut alors, en même temps, dépolluer et valoriser. Par exemple

- produits d'ensimage et indigo en industrie textile (UF),
- pigments et résines dans les eaux de rinçage derrière peinture électro-phorétique (UF, MF),
- protéines des eaux rouges des féculeries (UF),
- protéines de lactosérum (UF),
- métaux nobles en suspensions colloïdales (UF, MF),
- métaux de bains de galvanoplastie(ex. Nickel par OI),
- lignosulfonates des liqueurs noires des usines de pâte à papier,
- traitement des effluents très difficiles car peu biodégradables ou toxiques... Par exemple
- huiles "solubles" des machines-outils,
-lubrifiants de laminoirs à froid.

L'ultrafiltration peut permettre

- soit de "concentrer" les suspensions d'hydrocarbures de 10-30 $g.l^{-1}$ jusqu'à 300-500 $g.l^{-1}$ (incinérables),
- soit de purifier les solutions dites "synthétiques" de leurs impuretés en suspension, oxydes, huiles et graisses qui, autrement, obligent leur évacuation périodique. On prolonge ainsi la "vie utile" de produits coûteux et très polluants.

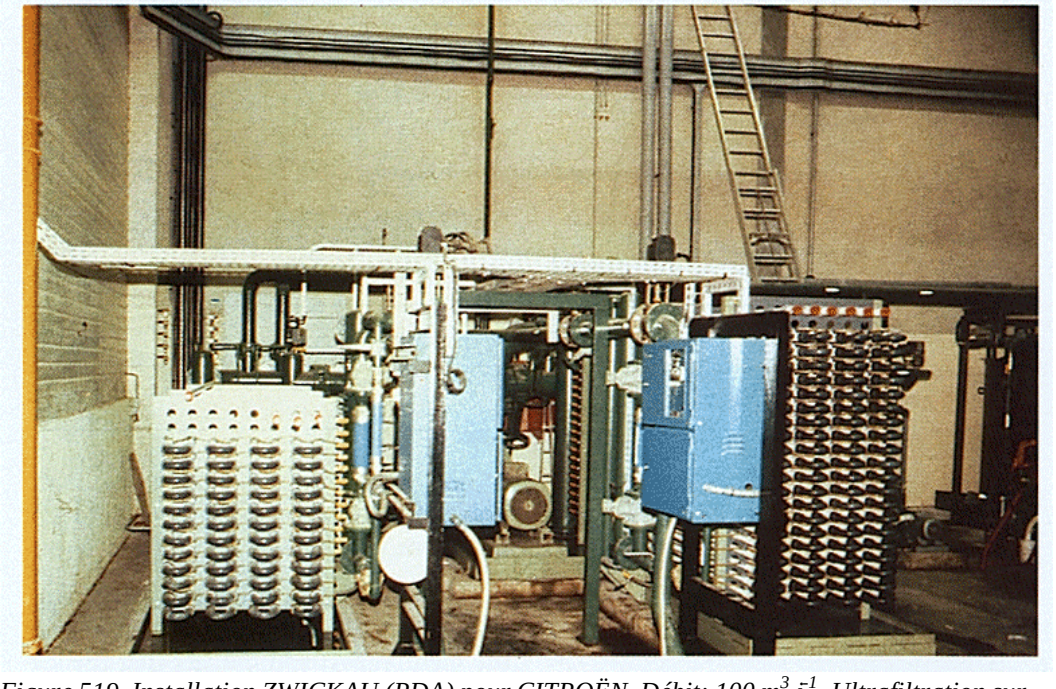


Figure 519. Installation ZWICKAU (RDA) pour CITROËN. Débit: 100 $m^3 j^{-1}$. Ultrafiltration sur huiles solubles.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.3. LES BIORÉACTEURS A MEMBRANES

On a vu au chapitre 11, page 694 l'importance, dans les traitements biologiques aérobies, des processus de clarification (séparation biomasse/eau) qui conditionnent la quantité de biomasse maintenue dans le réacteur, ainsi que la qualité de l'effluent (MES, DCO et DBO_5 non solubles).

Les membranes MF ont les propriétés recherchées pour effectuer cette séparation

- elles retiennent toutes les bactéries, pour les membranes avec pore inférieur à 0,4µm, et permettent donc de concentrer la biomasse à des valeurs très importantes et de réduire en conséquence le volume des réacteurs,
- elles laissent passer l'eau, les sels et autres métabolites dissous issus de la réaction biologique.

Les limites à l'utilisation proviennent essentiellement du coût d'investissement et des faibles flux possibles sur des membranes avec des cultures bactériennes à leur contact

- phénomènes de colmatage, voire de colonisation, contre lesquels il faut lutter (vitesse élevée de balayage, rétrolavages réguliers...),
- adsorption possible de métabolites dans les pores (lavage chimique).

Néanmoins, les membranes ont d'ores et déjà été utilisées dans des cas extrêmes

- **reclyclage d'eaux usées** dans les cas où une compacité et une sécurité maximales sont recherchées (ex. immeubles japonais): la microfiltration est alors associée à un traitement par boues activées où la membrane assure la clarification et le maintien dans le récteur aérobie d'une biomasse concentrée à 10-15 $g.l^{-1}$; la production de boues en excès est très réduite.

Dans ce cas, on peut obtenir des eaux très bien épurées : MES < 1 $mg.l^{-1}$, DBO_5 < 5 ($mg.l^{-1}$) .

- **clarification derrière digesteur anaérobie** ; les performances des systèmes "contact" (cf. chapitre 12) sont limitées par l'épaississement insuffisant des boues. L'emploi d'une MF, plane ou tubulaire, a permis de maintenir dans de tels digesteurs jusqu'à 30 $g.l^{-1}$ de MES de boues à 60 % MV, et d'augmenter en proportion la charge appliquée. L'emploi d'un système d'épaississement performant permet donc de réduire le volume du réacteur.

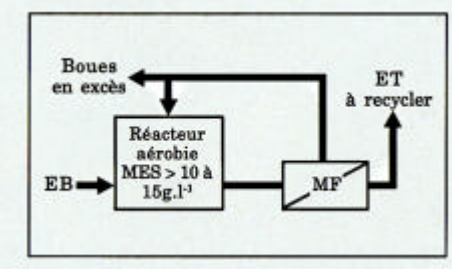


Figure 520. Bioréacteur à membranes.

Avec l'évolution des membranes, on peut aller jusqu'à concevoir des systèmes, tels que celui de la figure 520 où le réacteur aérobie, protégé contre les contaminations externes, peut travailler en culture "pure" bien adaptée à une pollution spécifique ou à des pollutions à haute concentration. Ainsi, des cinétiques de dégradation très élevées sont concevables, qui minimiseraient les volumes de réacteur et même permettraient d'éliminer des substances non dégradables par les procédés classiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

16
DEGAZAGE, STRIPPAGE, ÉVAPORATION

Les appareils industriels destinés à réaliser, par échange gaz - liquide, le dégazage, ou strippage, peuvent être groupés suivant leur fonction, en:

- éliminateurs de CO, et strippeurs à l'air ou au gaz,
- strippeurs à la vapeur et distillateurs,
- dégazeurs thermiques,
- dégazeurs sous vide,
- dégazeurs combinés.

Les laveurs de gaz, de conception analogue, mais fonctionnant en absorption, doivent leur être rattachés.

1. ÉLIMINATEURS DE CO_2 ET STRIPPEURS A L'AIR OU AU GAZ

L'élimination de $C0_2$ est nécessaire au cours de différents procédés de traitement d'eau

- ajustement de pH d'une eau potable,
- élimination de $C0_2$ d'une eau à déminéraliser après passage sur résine cationique,
- élimination de $C0_2$ sur une liqueur de boues activées (cas de l'oxygène pur) ou sur les ERI.

On considère ici que les colonnes à masse de contact sont utilisées le plus fréquemment; mais cette opération peut être aussi réalisée:

- par simple pulvérisation (voir page 874)
- par bullage (voir pages 705 et 877),
- par dispersion mécanique (voir pages 699 et 877).

Dans ces appareils à masse de contact, un fort contre-courant de gaz, appelé gaz d'entraînement, extrait le gaz dissous indésirable. Au fur et à mesure de sa descente dans la colonne, le liquide s'appauvrit en gaz dissous et s'enrichit en gaz contenu dans la phase gazeuse d'entraînement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'efficacité de ces strippeurs, gouvernée par les lois d'échange gaz - liquide, demande donc:

- une très bonne répartition ou pulvérisation de l'eau sur toute la surface de la colonne,
- une très grande surface de contact entre les phases liquide et gazeuse,
- une pureté du gaz d'entraînement, évitant une contamination supplémentaire de l'eau à traiter,
- une parfaite distribution de ce gaz d'entraînement à la base de la colonne.

Suivant leur application principale, ces appareils sont appelés éliminateurs de CO_2, strippeurs à l'air ou strippeurs au gaz.

1.1. ÉLIMINATEURS DE CO_2

Dans ces appareils (figure 521), l'eau est, soit pulvérisée, soit finement dispersée et uniformément répartie au-dessus d'un garnissage, ordonné ou en vrac, constitué par des anneaux, selles..., en matériau plastique ou inoxydable. L'air est amené par un ventilateur au-dessous du plateau perforé supportant le garnissage. L'air et l'eau circulent à contre-courant. L'eau dégazée est recueillie dans une bâche placée sous la colonne de contact

Comme évoqué au chapitre 3, page 276 sur l'échange gaz/liquide, la concentration résiduelle de CO_2 en phase liquide est fonction de la température, de la vitesse de passage de l'eau, du type et du volume de garnissage, ainsi que du débit d'air.

Les caractéristiques générales des éliminateurs DEGREMONT sont

- débit d'eau: environ 30 à 70 $m^3.h^{-1}$ par m^2 de section droite,
- débit d'air: environ 10 à 40 fois le débit d'eau,
-hauteur de garnissage: 1,5 à 2,5 m. Un éliminateur de CO_2 correctement calculé permet d'atteindre une concentration résiduelle très proche de la concentration d'équilibre.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. Éliminateurs de CO2 et stoppeurs à l'air ou au gaz.

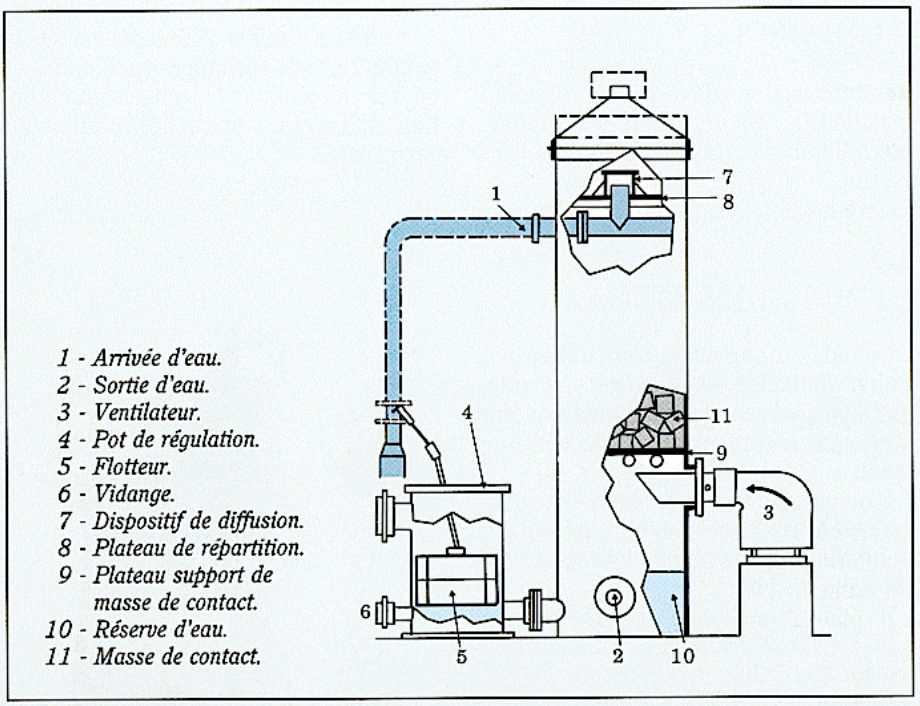


Figure 521. Éliminateur de CO_2.

Figure 522. Installation de NANGIS (Seine-et-Marne) pour la SEIF. (Groupe ORKEM). Débit: 140 $m^3.h^{-1}$. Éliminateur de CO_2 installé dans l'unité de traitement des condensats ammoniacaux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.
STRIPPEURS A L'AIR

De conception identique aux éliminateur de CO_2,, ces dégazeurs sont utilisés pour éliminer certains gaz dissous dans les eaux, tels que H_2S et solvants chlorés.

Les débits d'eau et d'air dépendent de la température de l'échange gaz/liquide, du ou des gaz à éliminer (concentration initiale et finale), du type et de la hauteur du garnissage.

1.3.
STRIPPEURS AU GAZ

Quand l'air ne peut pas être utilisé (pollution véhiculée ou oxygène), un autre gaz disponible en quantité suffisante (gaz inerte, gaz naturel) sert de gaz d'entraînement.

Dans les forages pétroliers, les strippeurs au gaz naturel sont ainsi utilisés
pour éliminer l'oxygène de l'eau réinjectée dans les puits.

Ils fonctionnent sous très légère pression, de façon à alimenter une torchère avec le gaz pollué.

Figure 523. Installation d'ENCHOVA (Brésil) pour PETROBRAS. Débit : 2 x 270 $m^3.h^{-1}$. Strippage d'eau de mer au gaz naturel

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. STRIPPEURS A LA VAPEUR ET DISTILLATEURS

Quand les gaz à extraire sont très solubles (NH_3), le dégazage effectué à tempé rature ordinaire est une solution peu éco nomique. Comme la solubilité des gaz décroit quand la température augmente, leur élimination est facilitée par des températures élevées.

Cette opération est réalisée dans des strippeurs à la vapeur ou des distillateurs (présence d'un reflux), dans lesquels la vapeur a un double rôle: réchauffer la phase liquide et entraîner les gaz dissous à extraire.

La principale application en traitement d'eau est l'élimination de l'ammoniac d'effluents de gazéification ou de cokerie (figure 524). L'eau à traiter est introduite en tête de la colonne, la vapeur circulant à contre-courant est injectée en pied. Le contact entre les phases liquide et gazeuse peut être assuré, soit par une succession de plateaux, soit par une masse de contact répartie en plusieurs étages. La teneur en ammonium dans l'eau à traiter nécessite souvent d'ajouter au-dessus de l'entrée d'eau une zone supplémentaire de concentration de buées ammoniacales. Cette concentration permet de choisir la destination de ces buées (récupération ou destruction).

Dans tous les cas, la réalisation de telles installations nécessite des précautions particulières, tant pour le choix des équipements (corrosion, dépôts de goudrons), que pour leur mise en oeuvre et leur exploitation (gaz nocifs, produits dangereux).

Figure 524. Installation de SERAING (Belgique) pour COKERILL-SAMBRE. Débit: 30 $m^3.h^{-1}$. Distillation d'eaux ammoniacales de cokerie

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. DÉGAZEURS THERMIQUES

Une application fréquente du strippage à la vapeur est l'élimination de l'oxygène et du gaz carbonique dissous dans l'eau d'alimentation d'un générateur de vapeur.

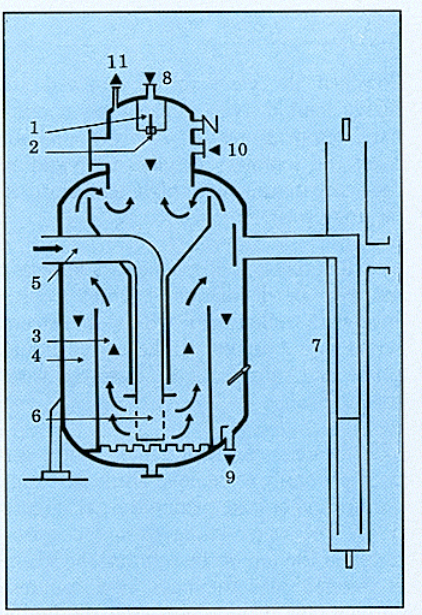
Ce procédé est mis en œuvre dans des dégazeurs thermiques, où sont maintenues les conditions appropriées de pression et de température de vapeur saturante telles que les gaz dissous passent dans la phase vapeur et soient évacués vers l'extérieur en continu.

Les dégazeurs thermiques peuvent, suivant l'application, fonctionner sous pression ou sous faible vide, et répondent dans tous les cas aux conditions imposées par l'échange gaz - liquide

- réalisation d'une interface maximale eau vapeur,
- maintien de la température de l'eau à une valeur très voisine de la température de vapeur saturante à la pression de dégazage,
- maintien d'une pression partielle du gaz à éliminer inférieure à celle correspondant, d'après les lois d'échange gaz - liquide, à la teneur finale exigée,
- parfaite distribution des phases liquide et gazeuse.

Suivant leur conception, les dégazeurs thermiques DEGRÉMONT peuvent être classés en:

- dégazeurs thermiques avec stockage intégré
- dégazeur à bâche verticale,
- bâche dégazante.
- dégazeurs thermiques avec stockage séparé:
- dégazeur dôme,
- dégazeur à garnissage.



1 – Spray valve water box.
2 – Spray valve.
3 – Steam scrubber.
4 – Storage tank.
5 – Steam piping.
6 – Bubbler.
7 – Hydraulic siphon.
8 – Water to deaerate.
9 – Deaerated water.
10 – Condensate return (optional).
11 – Gas vent.

Figure 525. Vertical deaerating heater.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. 1.
DÉGAZEUR
A BÂCHE VERTICALE

Cet appareil est principalement employé pour de faibles débits d'eau, ne dépassant pas 20 à 25 $m^3.h^{-1}$, et fonctionne généralement sous une pression de 0,3 bar.

Sa construction monobloc comporte trois zones (figure 525):

- zone de réchauffage, située en partie haute où l'eau pulvérisée (2) rencontre une partie de la vapeur s'échappant du bouilleur et se réchauffe,
- bouilleur situé, en partie centrale, où l'eau provenant de la zone de réchauffage est mise en contact intime avec la vapeur soigneusement dispersée dans un barboteur (6),
- zone de stockage d'eau dégazée (4) alimentée par débordement du bouilleur et terminée par une tubulure (9) de départ d'eau dégazée.

Les gaz entraînés par la vapeur sont évacués à l'extérieur en partie haute, dans l'espace annulaire entourant la boîte de pulvérisation (11).

Des dispositifs de sécurité (siphon hydraulique et clapet casse - vide) sont installés pour se prémunir contre les mises accidentelles en pression et sous vide.

3.2.
BÂCHE DÉGAZANTE

La bâche dégazante DEGRÉMONT est conçue pour fonctionner à des pressions supérieures ou égales à 0,3 bar et elle permet de traiter des débits d'eau froide allant de 25 $m^3.h^{-1}$ à 600 $m^3.h^{-1}$.

Cet appareil horizontal comporte également trois compartiments (figure 526)

- compartiment de réchauffage (1) situé sous l'arrivée d'eau pulvérisée, où l'eau est réchauffée par la vapeur s'échappant du bouilleur par la chicane (4),
- compartiment bouilleur (2), où la vapeur est parfaitement répartie par un réseau de rampes de distribution.

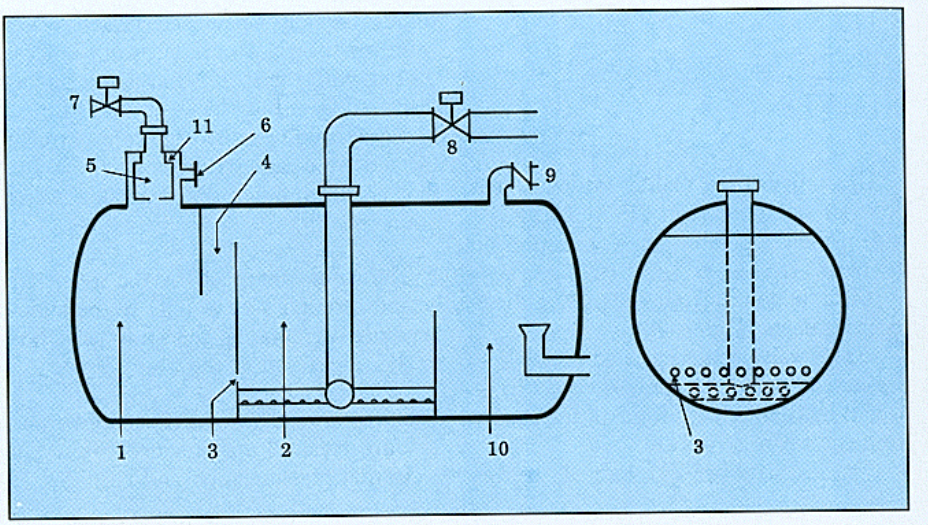
L'eau pénètre dans le bouilleur par des orifices calibrés (3), grâce à une circulation naturelle créée par la différence de masse volumique de la phase liquide entre les deux compartiments réchauffage (eau + vapeur condensée) et bouilleur (mélange biphasique eau et vapeur), -compartiment de stockage d'eau dégazée (10) alimenté en eau dégazée par débordement du bouilleur.

L'eau et la vapeur sont soigneusement admises dans la bâche dégazante, par l'intermédiaire de vannes régulatrices (7 et 8), respectivement actionnées par le niveau d'eau dans l'appareil et par la pression de la phase vapeur de l'enceinte. La bâche désaératrice comporte des dispositifs de sécurité:

- contre le vide: clapet casse - vide,
- contre les surpressions: siphon hydraulique ou soupape(s), suivant la pression de dégazage,
- contre l'engorgement: siphon ou trop plein.

Cet appareil peut accepter des variations de débit assez importantes (facteur 1 à 5 suivant l'application) et permet d'obtenir une très faible concentration en oxygène dans l'eau dégazée (inférieure ou égale à 10 $\mu g.l^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 – Spray valve heater.
2 – Steam scrubber.
3 – Calibrated orifices.
4 – Baffle.
5 – Spray valve box.
6 – Venting of gases mixed with steam.
7 – Water to deaerate.
8 – Steam inlet valve.
9 – Vacuum-breaker.
10 – Deaerated water.
11 – Annular space around sprayers.

Figure 526. Horizontal deaerating heater.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

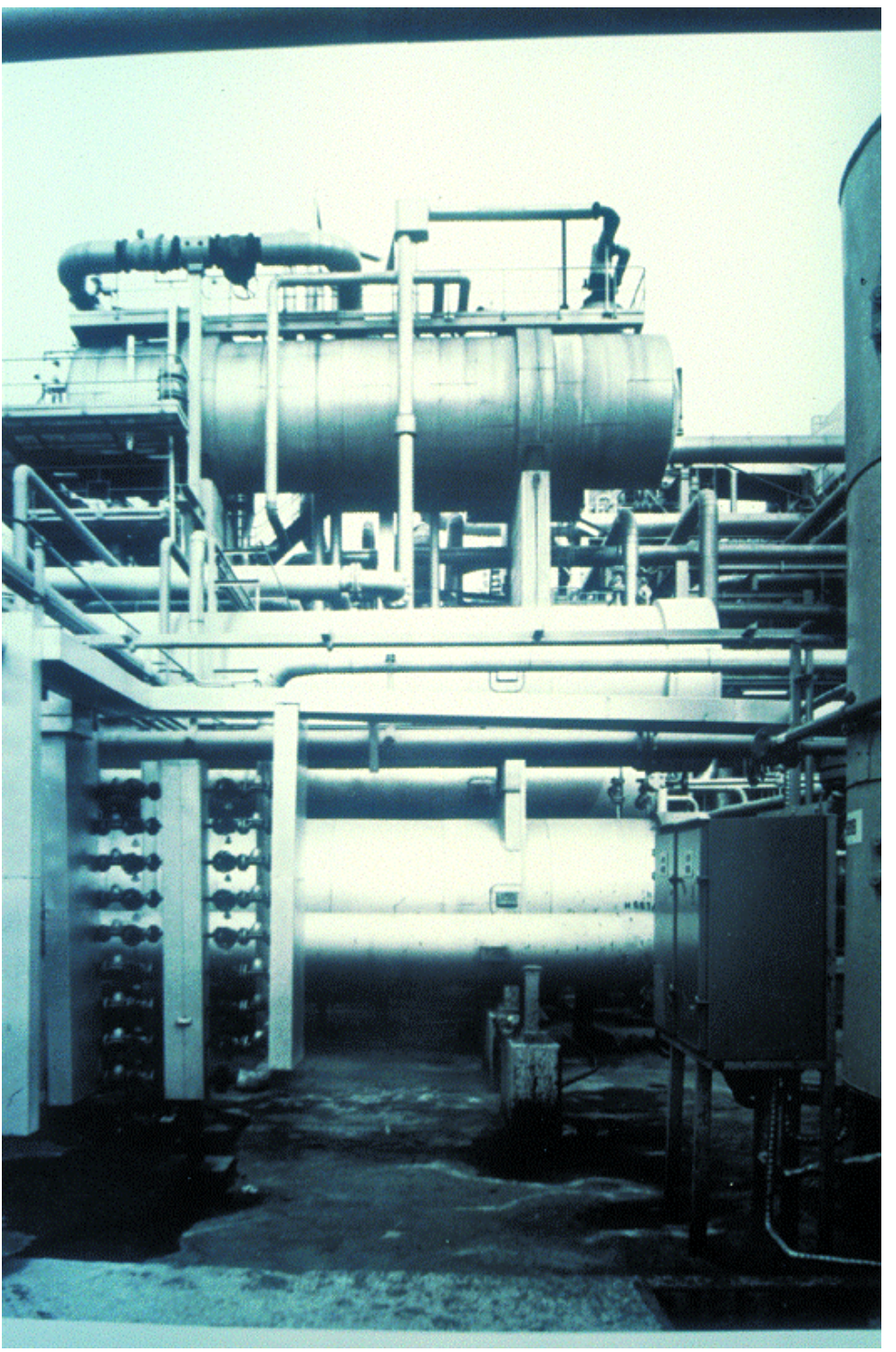


Figure 527. Installation de POLYCHÉMIE BEDRIJF BEEK (Pays-Bas) pour D.S.M. (Dutch Staat Smijnen). Débit: 255 $m^3.h^{-1}$. Bâche dégazante.

3.3. DÉGAZEUR DÔME MONTÉ SUR BÂCHE DE STOCKAGE

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

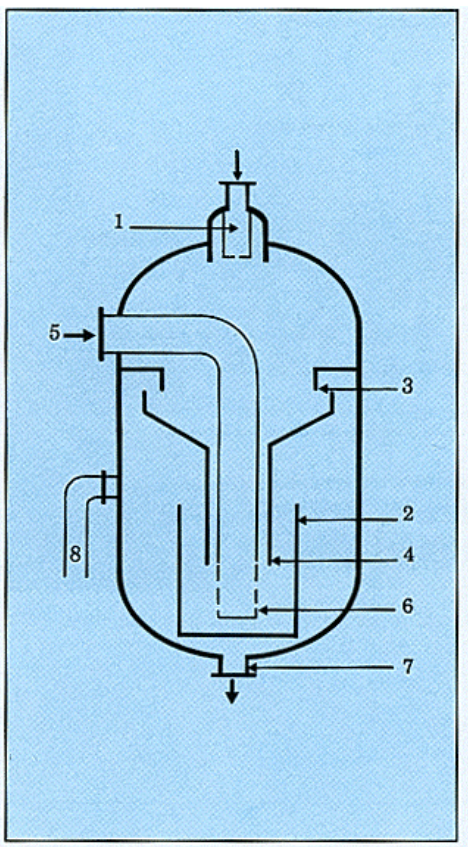
Cet appareil ne comporte que les zones de réchauffage et de barbotage des dégazeurs précédents, l'eau dégazée étant stockée dans une bâche séparée, sur laquelle il est monté.

Sa conception (figure 528) s'inspire des principes mis en œuvre dans le dégazeur

à bâche verticale. Le dégazeur dôme et la bâche de stockage sont en communication par la tuyauterie d'eau dégazée (7) et par la tuyauterie d'équilibrage (8), qui maintient la même pression dans les deux enceintes.

Le dégazeur dôme s'accommode de remises en route fréquentes, et ses hautes performances sont pratiquement indépendantes des grandes variations de régime qu'il peut subir.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 – Spray valve box.
2 – Steam scrubber.
3 – Heated water collection.
4 – Inlet at bottom of steam scrubber.
5 – Steam distribution pipe.
6 – Diffuser.
7 – Deaerated water.
8 – Steam pressure equalizer.

Figure 528. Deaerating heater with horizontal storage tank.

3.4. DÉGAZEUR A GARNISSAGE

Comme le dégazeur dôme, cet appareil est généralement monté sur une bâche de stockage, à laquelle il est relié par les mêmes tuyauteries d'eau dégazée et d'équilibrage de pression.

L'interface gaz - liquide se fait sur une masse de contact constituée par exemple d'anneaux métalliques ou plastiques.
L'eau est pulvérisée au-dessus du garnissage et la vapeur est injectée sous le plateau support.
Le dégazeur à garnissage présente, pour un même débit d'eau à dégazer, un diamètre moindre que le dégazeur dôme. Comme lui également, il peut accepter des variations de régime et des remises en route fréquentes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 529. Installation de PARIS-LA VILLETTE (Seine) pour la C.P.C.U.
Débit: 120 th^{-1}. Dégazeur à garnissage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. DÉGAZEURS SOUS VIDE

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sont décroissantes des étages supérieurs vers les étages inférieurs, de façon à permettre l'écoulement de l'eau d'un étage à l'autre. Ces dégazeurs sont équipés d'organes de régulation et de contrôle adaptés au fonctionnement sous vide. L'ensemble doit être parfaitement étanche à toute entrée d'air qui compromettrait le traitement.

Les dégazeurs sous vide à température ambiante trouvent une application dans les chaînes de ré injection en forages pétroliers (eau douce ou eau de mer).

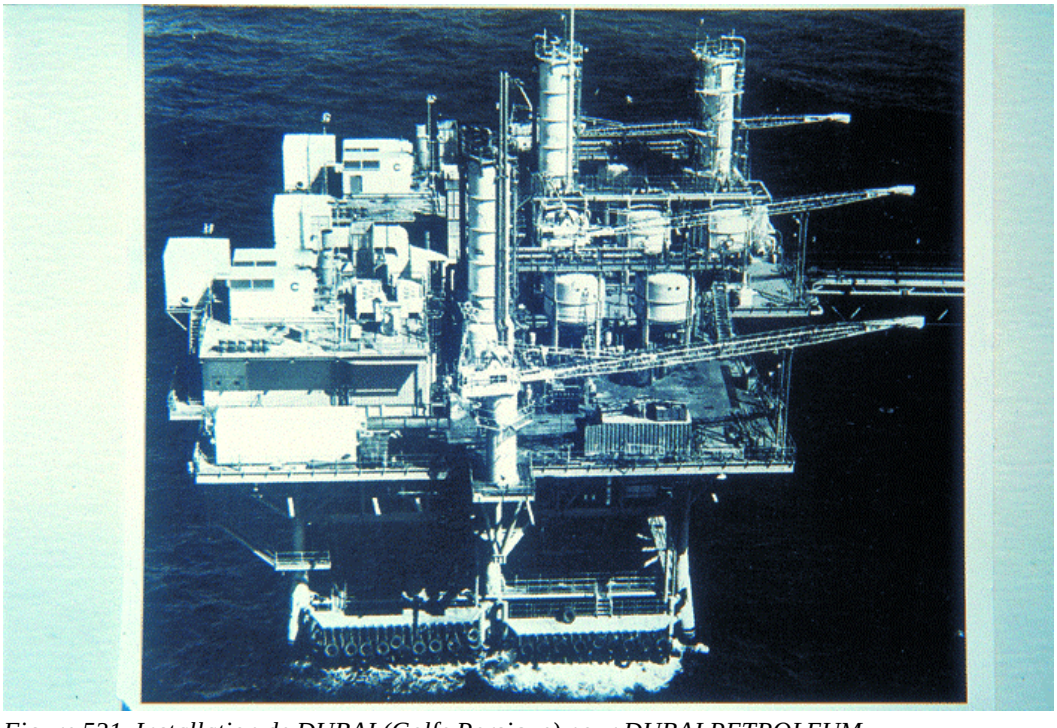


Figure 531. Installation de DUBAI (Golfe Persique) pour DUBAI PETROLEUM. Débit: 3 X 750 $m^3.h^{-1}$. Plate-forme d'injection d'eau de mer. 3 dégazeurs sous-vide.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. DÉGAZEURS COMBINÉS

Dans le cas de fortes concentrations en gaz, deux dispositions sont envisageables a) sur les eaux très chargées en CO,, traitement en deux étapes avec:

- passage dans un éliminateur de C02,
- élimination poussée de gaz restant dans un dégazeur sous vide,

b) pour l'élimination d'O2 sur des eaux froides, mise en œuvre d'un gaz d'entraînement dans un dégazeur sous vide, combinant ainsi les avantages des deux techniques. Cette réalisation est praticable sur les champs pétroliers, en traitement d'eau d'injection.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. LAVEURS - DÉSODORISEURS D'AIR

Il s'avère souvent nécessaire de traiter l'air vicié dans des stations d'épuration urbaines ou industrielles, ou dans certains ateliers (chimie de synthèse, biochimie, industries agro - alimentaires, etc.).

Un moyen efficace de résoudre ce problème d'odeurs consiste à laver l'air par une solution appropriée. L'élimination des polluants est régie par les lois de l'échange gaz - liquide.

Les principaux polluants peuvent être classés en différentes catégories:

- produits soufrés: H_2S mercaptans, sulfures,
- produits azotés: ammonium, amines, oxydes d'amines, indole, scatole...,
- produits organiques divers: acides organiques (acétique, propionique, butyrique...), aldéhydes, hydrocarbures, phénols.

A titre d'exemple, le tableau 80 donne l'ordre de grandeur du seuil olfactif de certains de ces composants.

Les solutions employées pour traiter les produits précédents sont: soude, acide, eau de javel, eau ozonée ; elles servent, soit à capter le polluant par dissolution simple, soit à le neutraliser par action chimique. Ex.:

$H_2S + 4\ NaClO \rightarrow H_2SO_4 + 4\ NaCl.$

Leur choix dépend du ou des polluants à éliminer et du degré d'élimination recherché. Il arrive fréquemment que plusieurs lavages différents soient associés sur une chaîne de laveurs placés en série, permettant d'atteindre, en plusieurs étapes, l'élimination très poussée de la majorité des polluants.

Les laveurs fréquemment rencontrés pour l'épuration de l'air vicié sont :

6.1. LAVEURS A VENTURI

L'air à épurer, introduit à forte vitesse, est mis en contact intime avec la solution épuratrice finement dispersée dans le courant gazeux. L'air traité sort à la partie supérieure et le liquide contenant les gaz absorbés est évacué en partie basse.

Ces appareils, surtout utilisés sur de l'air chargé de poussières, présentent de fortes pertes de charge qui entraînent de grandes consommations énergétiques.

Tableau 80. Seuil d'odeur de certains composés (dans l'air en mg.Nm^{-3})

Acides gras volatils		**Produits soufrés**	
Formique	3,0	H_2S	0,012
Acétique	0,95	SO_2	0,6
Propionique	0,08	Méthyl mercaptan	0,003
n-butyrique	5,0	Diméthyl sulfure	0,008
n-valérique	1,2	Diméthyl disulfure	0,01
Aldéhydes		**Produits azotés**	
Formaldéhyde	0,07 à 1,2	Ammoniac	0,02 à 0,6
Acétaldéhyde	0,05 à 0,4	Monoéthylamine	0,02
Acroléine	0,16	Diméthylamine	0,05

6.2. LAVEURS A GARNISSAGE

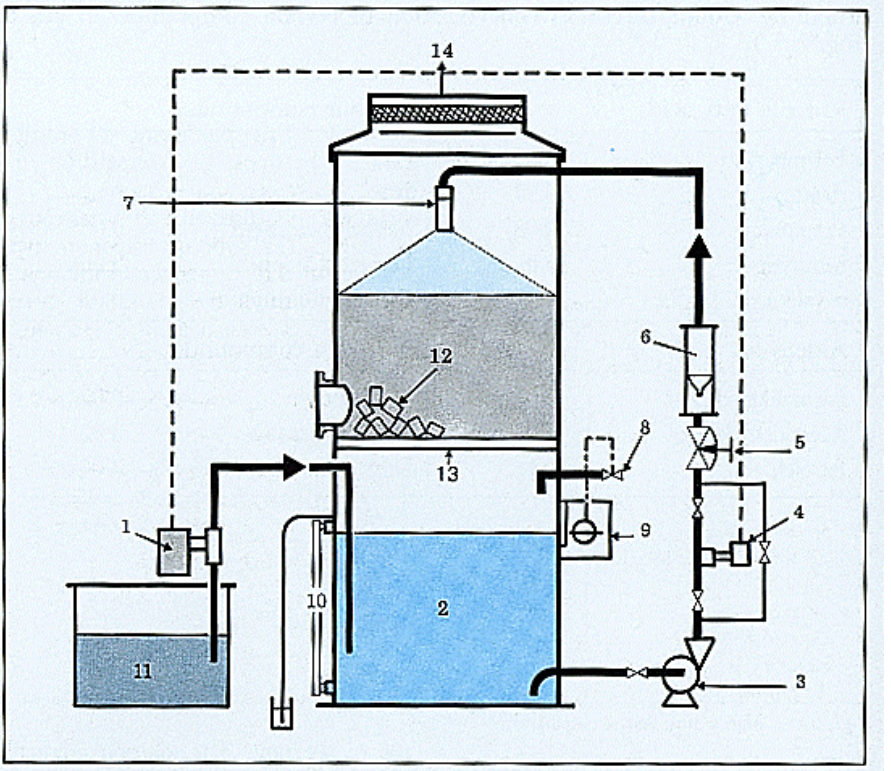
Dans ces appareils, la mise en contact intime des phases gazeuse et liquide, se fait sur un garnissage qui est soit ordonné (tubes, modules), soit en vrac (anneaux, selles, disques perforés...).

Le laveur DEGRÉMONT comporte un garnissage plastique diposé en vrac. Les composés volatils à éliminer sont absorbés au fur et à mesure de la montée de l'air dans le garnissage (figure 532).

La solution de lavage, bien répartie au-dessus du garnissage, est reprise sous l'appareil. Une pompe assure son recyclage à la partie supérieure et la solution se sature progressivement au cours des recirculations successives. Quand la saturation en produits polluants est totale, la solution épuisée est évacuée vers une unité de traitement et une nouvelle bâchée de solution neuve est admise dans le laveur.

Les laveurs DEGRÉMONT permettent de traiter des débits d'air d'environ 4000 $Nm^3.h^{-1}$ par m^2 de section, avec des débits de solution recyclée très faibles. Suivant la taille des appareils, leur construction est en plastique ou en béton.

Les rendements d'élimination des polluants malodorants peuvent être très élevés selon la combinaison des réactifs et le nombre d'étages.



1 – Concentrated reagent feed pump.
2 – Scrubbing liquid tank.
3 – Wash water pump.
4 – pH probe.
5 – Flow control valve.
6 – Flow meter.
7 – Spray nozzle.
8 – Make-up water valve.
9 – Level regulator.
10 – Level indicator.
11 – Concentrated reagent.
12 – Packing.
13 – Air inlet.
14 – Air outlet.

Figure 532. Diagram of the scrubbing-deodorizing circuit.

7. ÉVAPORATEURS D'EAU DE MER

7.1. BOUILLEUR MARINE

Le précurseur de l'évaporation de l'eau de mer est un évaporateur à simple effet (figure 533). On fait bouillir l'eau en la portant à 100 °C grâce à un fluide de chauffage abondant à bord des navires :eau de réfrigération des groupes diesel, gaz d'échappement. La vapeur est condensée sur un échangeur refroidi à l'eau de mer. Ce type de bouilleur se caractérise par une consommation d'énergie élevée, jusqu'à 250 fois l'énergie théorique nécessaire à la vaporisation d'un litre d'eau de mer.

1 - Arrivée d'eau de mer.
2 - Eau de mer à distiller.
3 -Rejet d'eau de mer.
4 -Rejet de saumure.
5 - Eau distillée.
6 - Fluide de chauffage.
7 - Extraction d'air.

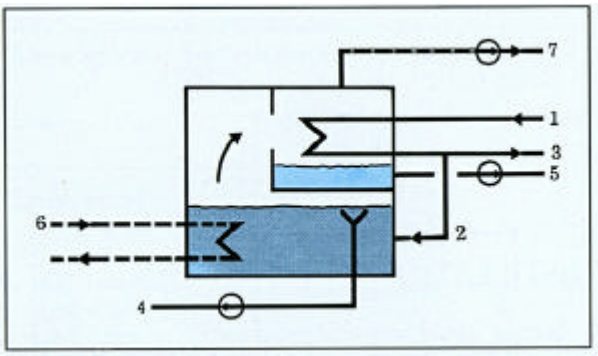


Figure 533. Bouilleur Marine.

7.2. DISTILLATION A MULTIPLES EFFETS

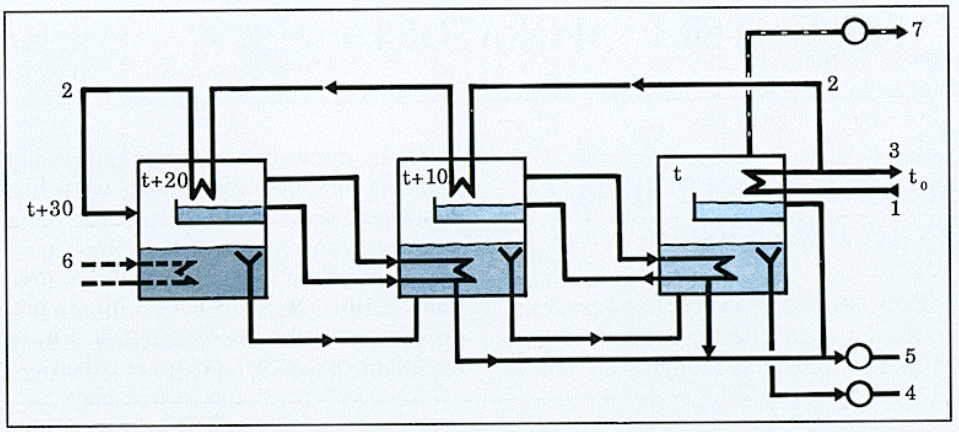
La recherche d'une récupération aussi complète que possible de la chaleur latente de vaporisation, et la distillation sous pression réduite, ont amélioré sensiblement la consommation spécifique dans les appareils à multiples effets (figure 534).

On utilise la chaleur produite par la condensation de la vapeur dans un premier évaporateur pour alimenter le faisceau de chauffe d'un deuxième évaporateur, puis la chaleur de condensation du deuxième évaporateur pour alimenter un troisième et ainsi de suite.

Avec un tel schéma, la consommation spécifique est de l'ordre de 100 $kcal.kg^{-1}$ d'eau produite. La déperdition de température d'un effet à l'autre est de 7 à 10 °C. Le nombre d'effets est en général limité à une dizaine.

L'utilisation des évaporateurs à "descendage" (appelés également à longs tubes verticaux "LTV") permet de ramener cette consommation spécifique à environ 40 $kcal.kg^{-1}$ par l'amélioration du coefficient de transmission de chaleur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



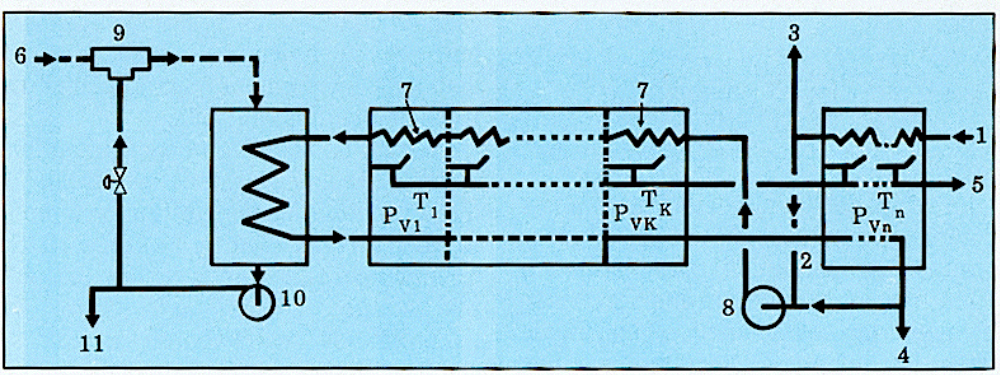
1 – Sea water inlet. 2 – Sea water to be distilled. 3 – Sea water reject. 4 – Brine reject. 5 – Distilled water. 6 – Heating fluid. 7 – Air exhaust.

Figure 534. Multiple-effect distillation.

7.3. DISTILLATION A DÉTENTE ÉTAGÉE

(Évaporateurs "Mufti-Flash")

Dans ces appareils (fig. 535), une pompe de circulation envoie dans les faisceaux des condenseurs un débit qui s'échauffe de cellule en cellule, puis traverse un réchauffeur, alimenté à la vapeur, qui porte la température de 90 à 112 °C, selon l'appareil ; l'eau de mer redescend ensuite de cellule en cellule, en subissant une série de détentes entraînant à chaque fois la vaporisation et produisant un condensat extrait des cellules par pompe.



1 - Arrivée d'eau de mer. 2 - Eau de mer à distiller. 3 - Rejet d'eau de mer. 4 - Rejet de saumure. 5 - Eau distillée. 6 - Fluide de chauffage. 7 - Condenseurs. 8 - Pompe de circulation. 9 - Désurchauffeur. 10 - Réchauffeurs. 11 - Condensats. T - Température. P_v - Pression de vaporisation

Downloaded from https://hydrauliespot.blogspot.com/

Figure 535. Distillation à détente étagée.

Le principal intérêt de cette technique est la suppression des surfaces d'échange au niveau de la vaporisation réduisant à 2 °C la déperdition de température d'une cellule à l'autre et permettant d'atteindre des consommations spécifiques de l'ordre de 40 $kcal.kg^{-1}$.

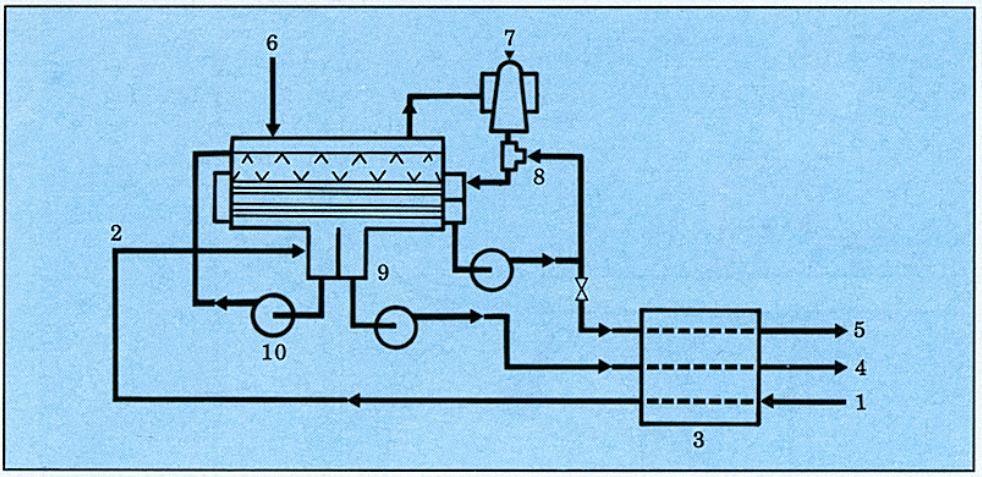
7.4. DISTILLATION AVEC COMPRESSION DE VAPEUR

Par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur, les calories sont transférées de la source froide à la source chaude grâce à une énergie mécanique produite dans une machine thermique à bon rendement (fig. 536).

En pratique, un compresseur, ou unéjecteur, aspire la vapeur produite dans l'évaporateur et la refoule à pression plus élevée dans un faisceau immergé dans la saumure à chauffer. La vapeur se condense alors en cédant les calories correspondant à la chaleur latente de vaporisation.

Ce système permet d'atteindre des consommations spécifiques très basses de l'ordre de 30 $kcal.kg^{-1}$..

Le nombre des effets varie de 2 à 4. La température maximale n'excède pas 57 °C.



1 – Sea water inlet.
2 – Sea water to be distilled.
3 – Exchanger.
4 – Brine discharge.
5 – Distilled water.
6 – Auxiliary steam.
7 – Compressor.
8 – Desuperheater.
9 – Outlet.
10 – Recycle.

Figure 536. Mechanical steam compression.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

17
OXYDATION - DÉSINFECTION

1. OXYDATION PAR L'AIR

Ces techniques utilisent l'oxygène de l'air et suivent les lois de l'échange gaz - liquide. Il faut rappeler que l'oxygénation d'une eau par aération peut entraîner une modification importante, et non souhaitée, du caractère incrustant ou agressif de l'eau: le strippage du CO, tend à rendre l'eau incrustante et peut conduire à une précipitation du carbonate de calcium.

On peut classer les procédés d'oxydation par le mode de mise en contact des phases liquide et gazeuse:

- ruissellement,
- pulvérisation dans l'air,
- injection d'air dans la masse liquide.

La perte de charge créée par les aérateurs varie très fortement suivant la technique mise en œuvre et modifie en conséquence la ligne piézométrique de la station. Elle peut varier de quelques centimètres, avec les procédés par bullage, à plus de un bar avec les procédés par pulvérisation.

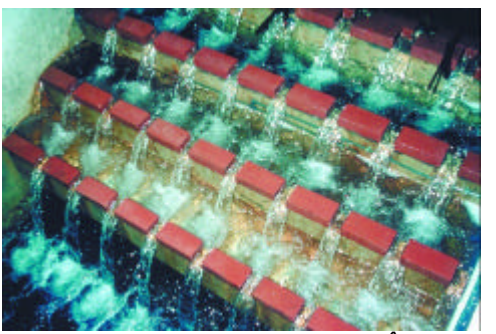


Figure 537. Installation de CHÂTEAU-LANDON (Seine-et-Marne).
Débit: 50 $^{m3}.h^{-1.}$ Dénitrification biologique. Aération par cascade après NITRAZUR DN

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.1. RUISSELLEMENT

Il nécessite une hauteur de chute variant de l à 3m.

1.1.1. Cascade

Ces dispositifs rustiques sont utilisés lorsqu'on dispose d'une certaine hauteur de chute (jusqu'à 1 ou 2 m) et qu'on ne recherche pas une efficacité trop importante (figure 537).

1.1.2. Ruissellement sur plateaux

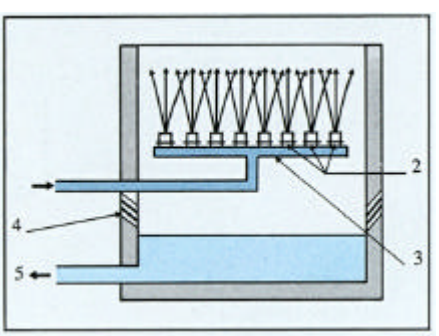
Ces aérateurs, à faible rendement, sont plus ou moins perfectionnés (avec ou sans pulvérisation, à tirage forcé ou naturel). Ils sont maintenant peu utilisés en traitement des eaux.

1.1.3. Ruissellement sur masse de contact

Cette technique est essentiellement mise en œuvre dans le traitement des ERU. Elle correspond au lit bactérien classique conventionnel (chapitre 4, page 308) ou au filtre sec type BIODROF (voir page 737).

1.2. PULVÉRISATION

La pulvérisation de l'eau est réalisée par des tuyères placées sur un ou plusieurs collecteurs ramifiés afin d'accroître l'interface eau/air. La pression nécessaire de l'eau dépend du type et du nombre de tuyères (figures 533 et 534)- Ces appareils, à rendement moyen, sont utilisés soit en dégazage ($C0_2$, H_2S...), soit en oxygénation de l'eau (déferrisation, démanganisation). Ils n'acceptent que de faibles variations de débit, sous risque de rendements trop faibles



1 - Eau à aérer.
2 - Tuyères de pulvérisation.
3 -Collecteur ramifié.
4 -Persiennes de ventilation.
5 -Eau aérée.
Figure 538. Tour de pulvérisation.

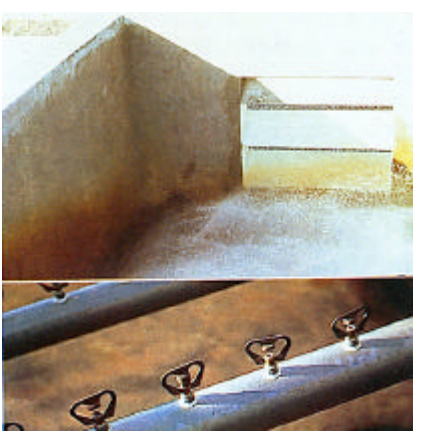


Figure 539. Tuyères de pulvérisation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.3. INJECTION D'AIR DANS LA MASSE LIQUIDE

1.3.1. Diffusion de gaz

Ce traitement consiste à disperser un gaz sous pression dans la masse liquide (chargée en MES).

Cette injection peut se faire directement dans une conduite sous pression, à travers un mélangeur à chicanes ou un dispositif déprimogène (figure 540).

Les équipements utilisés prennent souvent le nom correspondant à la grosseur des bulles de gaz produites

- dispositifs à **grosses bulles:** le gaz est injecté directement par des cannes verticales, ou par des diffuseurs à larges orifices tels que les DIPAIR, conçus pour des bassins de grande hauteur.
- dispositifs à moyennes bulles: les VIBRAIR,
- dispositifs à **fines bulles:** les diffuseurs poreux (DP 30), les diffuseurs à membrane (FLEXAZUR).

Les deux premiers dispositifs sont quasi exclusivement réservés au traitement d'aération des eaux résiduaires. Le troisième est aussi utilisé pour l'injection d'autres gaz tels que ozone, CO2, etc.

La description détaillée des diffuseurs de gaz se trouve au chapitre 11, page 705. Pour la diffusion de l'ozone, voir page 888.

On peut également aérer l'eau par "barbotage" d'un grand débit d'air sous faible hauteur d'eau (0,8 à 1 m en ERU et jusqu'à 0,25-0,30 m en EP). Les débits d'air peuvent atteindre 30 à 60 fois le débit d'eau. L'air est injecté au travers d'une grille perforée. Du fait de la faible hauteur 875 d'eau, ce système est très sensible aux variations de plan d'eau et de perte de charge du système de distribution. Il est

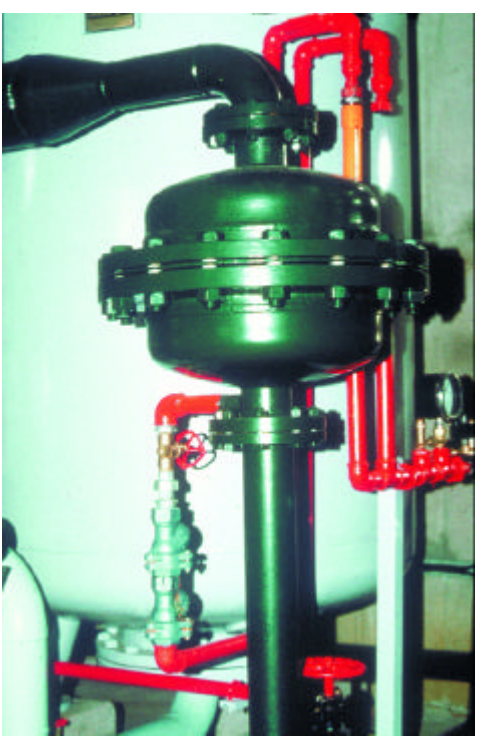
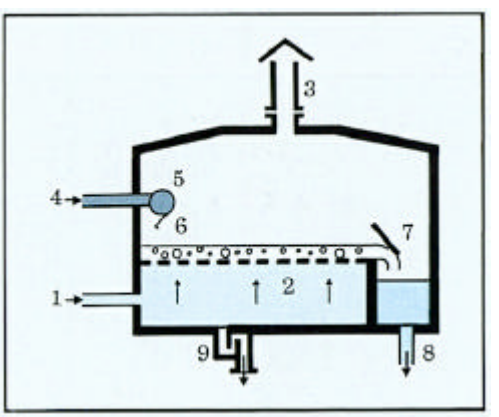
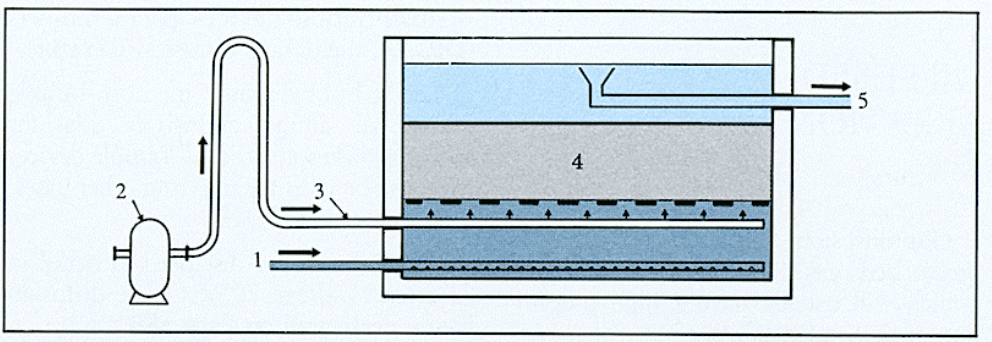


Figure 540. Injection d'air sous pression par mélangeur à chicane.



1 - Entrée d'eau. 2 - Tôle perforée.
3 -Évacuation de CO_2. 4 - Entrée d'air.
5 -Tuyau de répartition. 6 - Déflecteur.
7 -Pare-écume. 8 - Sortie d'eau traitée.
9 -Siphon.
Figure 541. Aérateur par "barbotage" sous faible hauteur d'eau (EP).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Water to be aerated. 2 - Air blower. 3 - Injection of pressurized air. 4 - Contact media. 5 - Aerated water outlet.

Figure 542 – Bubbling aerator with large head of water and contact media.

1 - Eau à aérer. 2 - Surpresseur d'air. 3 - Injection d'air surpressé. 4 - Masse de contact. 5 - Reprise d'eau aérée.
Figure 542. Aérateur par "barbotage" sous forte hauteur d'eau et masse de contact.

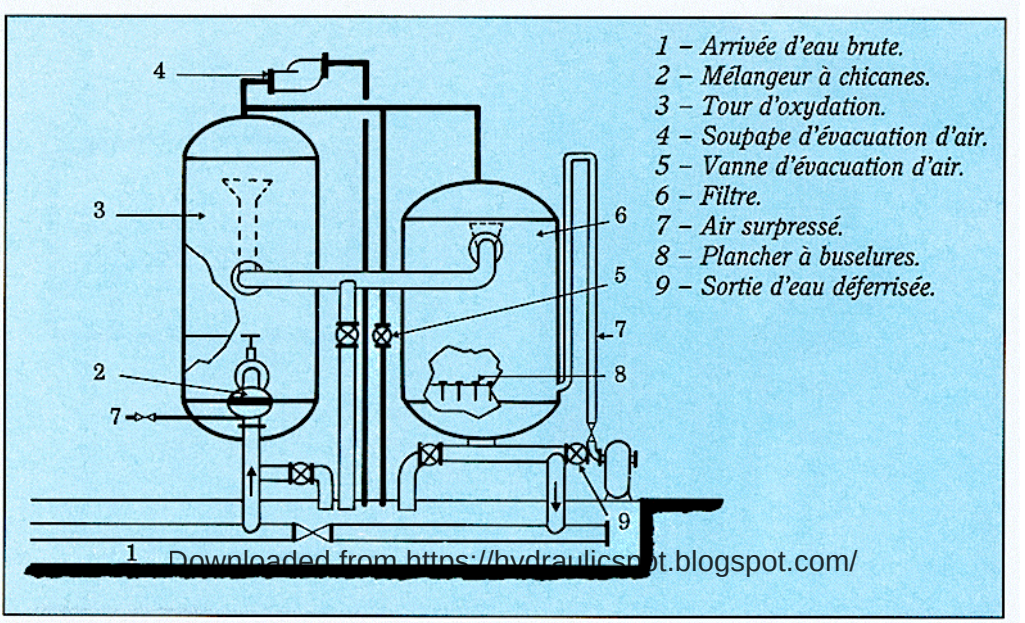
donc mal adapté aux grandes installations. Utilisé pour éliminer le C02, il peut conduire facilement à une eau entartrant.

1.3.2. Aérateurs à masse de contact

La masse de contact a pour but d'améliorer le transfert.

1.3.2.1. Aérateurs à surface libre

L'eau à traiter et l'air surpressé sont amenés à co-courant à la base de la cuve. L'eau aérée est reprise en surface. Le traitement est amélioré par la présence d'une masse de contact dont le rôle est d'accroitre considérablement les surfaces liquide et gazeuse en contact (figure 542). Ce



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 543. Poste de déferrisation sous pression.

type d'aération est plus particulièrement. réservé aux eaux peu chargées en MES.

On peut atteindre des taux de saturation de 65 % à 75 % à condition d'employer de forts débits d'air (50 à 100 $m^3.h^{-1}$ par m^2) avec des débits d'eau de 10 à 30 $m^3.h^{-1}$ par m^2.

Ce système est préconisé quand on recherche simultanément une élimination du gaz carbonique agressif et une oxydation suffisante du fer ferreux d'eau de forage. Il est également bien adapté aux traitements de nitrification ou de désaération d'une eau sursaturée.

Le barbotage est en outre utilisable chaque fois que l'on désire mettre un gaz en contact avec de l'eau: gaz carbonique en recarbonatation d'une eau chaulée, ozone en oxydation et désinfection; il est également utilisé en ERU (voir BIOFOR page 733).

Lorsqu'on recherche un effet filtrant combiné à l'oxygénation, on peut faire circuler l'eau à contre-courant comme dans le NITRAZUR N (voir page 740).

1.3.2.2. Aérateurs sous pression

Ces appareils sont souvent utilisés pour la déferrisation d'eaux d'origine profonde. La tour d'oxydation fermée comporte un lit de lave volcanique supporté par un plancher. L'eau brute, sous pression, alimente un mélangeur qui reçoit de l'air surpressé. Le mélange eau-air est envoyé à la base du lit de garnissage. L'excès d'air éventuel est évacué à L'atmosphère à travers une soupape L'eau est recueillie à la partie supérieure de la tour (figure 543).

1.3.3. Aérateurs et mélangeurs mécaniques

Cette famille d'équipements comprend:

- les aérateurs de surface,
- les mélangeurs sous forte hauteur d'eau avec injection d'air surpressé.

Ces appareils, au même titre que les diffuseurs de gaz surpressé, trouvent leur emploi principal en traitement d'eaux résiduaires et sont décrits au chapitre 11.

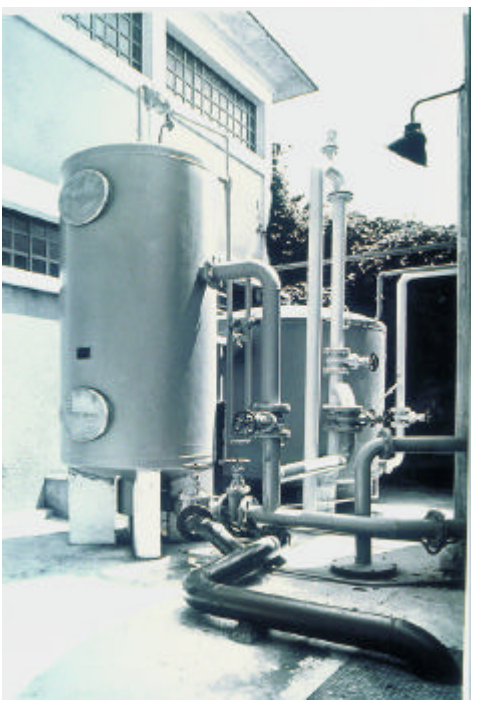


Figure 544. Installation de LANGOIRAN (Gironde). Débit: 50 $m^3.h^{-1}$ Tour d'oxydation et filtre pour la déferrisation d'eau potable.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. OXYDATION ET DÉSINFECTION PAR LE CHLORE

2.1. SOURCES DE CHLORE

On utilise le plus souvent soit le chlore, soit les hypochlorites.

. **Chlore gazeux**

Il est stocké et livré sous forme liquide dans des récipients sous pression (voir page 1078).

. **Hypochlorite de sodium**

Les solutions sont caractérisées par leur teneur en chlore actif, qui s'évalue en degrés chlorométriques.

1 degré chlorométrique = 3,17 g de Cl_2 par litre de solution.

La solution commerciale technique, appelée extrait de javel, titre 47 à 50 ° chlorométriques, correspondant à 150 $g.l^{-1}$ environ en équivalent de chlore actif. On trouve aussi de l'eau de javel, dont le titre est 15 ° chlorométriques environ. Il est important de vérifier fréquemment le titre de la solution d'eau de javel, qui détroit avec le temps. La dilution par une eau dure peut également entraîner des phénomènes d'entartrage.

La fabrication "in situ" est possible par électrolyse d'une saumure de chlorure de sodium ou d'eau de mer.

. **Hypochlorite de calcium**

Généralement utilisé sous forme solide en poudre, sa teneur peut atteindre 92 à 94% de $Ca(ClO)_2$, correspondant à 650-700 $g.kg^{-1}$ environ de chlore actif.

2.2. DOMAINES D'EMPLOI

Les installations de stockage de chlore liquide sont soumises à déclaration ou autorisation suivant la quantité de produit stocké et, de ce fait, doivent respecter les prescriptions imposées aux installations classées. Il faut, dans tous les cas, se reporter à la réglementation du pays considéré.

L'hypochlorite de sodium (extrait de javel) est en particulier utilisé lorsque, pour des raisons de sécurité de stockage, on ne peut employer le chlore gazeux.

L'hypochlorite de calcium a une teneur très élevée en chlore actif et est surtout employé dans des pays ne pouvant s'approvisionner ni en chlore gazeux, ni en solution d'hypochlorite de sodium (coût du transport).

2.3. MISE EN CONTACT

Le chlore et ses dérivés sont employés pour les eaux de consommation et de piscine, dans les circuits de refroidissement et également pour le traitement tertiaire des effluents urbains.

Le temps de contact nécessaire est essentiellement lié au but visé. A fin de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

désinfection, il peut atteindre jusqu'à deux heures. Pour des oxydations chimiques, il peut être limité à quelques minutes. Il est important que le mélange de la solution chlorée avec l'eau à traiter soit parfaitement et rapidement obtenu.

Par ailleurs, les bassins de contact doivent être aménagés pour éviter, dans la mesure du possible, tout court-circuit par lequel une partie de l'eau échapperait au temps de contact minimal nécessaire. Ceci est particulièrement important dans le cas de la désinfection des ERU. Dans ce cas, il est recommandé de mettre en oeuvre des bassins munis de chicanes, et dont le rapport longueur développée/largeur peut atteindre 70 et permet d'obtenir un flux piston favorable à la désinfection recherchée.

Dans le cas de la distribution des eaux de consommation, le problème du maintien d'un taux de chlore résiduel dans les réseaux est complexe. Il est en général résolu par des chlorations intermédiaires dans les stockages situés en série ou en dérivation. De toute façon le maintien de la qualité bactériologique de l'eau dans le réseau est conditionné par la qualité de l'eau à l'entrée du réseau (eau la mieux traitée possible), la qualité du réseau et de son entretien.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. OXYDATION ET DÉSINFECTION PAR LE DIOXYDE DE CHLORE

Caractéristiques

Le dioxyde de chlore est un gaz de couleur jaune et d'odeur piquante. Il est explosif aux concentrations supérieures à 10 % en volume dans l'air.

3.1. MODE DE PRÉPARATION

Le dioxyde de chlore est toujours produit "in situ", par réaction d'une solution de chlore ou d'acide chlorydrique sur le chlorite de sodium. Le choix entre les deux procédés est surtout dicté par la possibilité ou non d'un stockage de chlore gazeux. Les deux procédés nécessitent des préparations et des dispositions spéciales pour en assurer la sécurité (voir page 1091).

Utilisé en désinfection, l'obtention d'un résiduel de ClO_2 en fin de réseau nécessite parfois l'emploi de doses élevées de cet oxydant, du fait de la réduction du $C10_2$ par les MO de l'eau; on constate alors dans l'eau traitée un goût désagréable dû à l'ion ClO_2^-, par ailleurs indésirable du fait de sa toxicité. De nombreux pays ont limité le taux deClO_2 utilisable en désinfection (0,5 ou 1 mgl-1 par exemple).

Le ClO_2 a parfois été utilisé en préoxydation, mais il faut alors vérifier que le ClO_2^- produit par l'oxydo-réduction des MO contenues dans l'eau brute, est bien éliminé au long de la chaîne de traitement mise en oeuvre

3.2.
DOMAINE D'EMPLOI

Le dioxyde de chlore est un agent très oxydant, à haut pouvoir décolorant et désodorisant. Son action désinfectante vis-à-vis des micro-organismes est plus rapide que celle du chlore, son effet rémanent est également plus marqué. Il doit être utilisé de préférence au chlore lorsque l'eau à traiter contient des traces de phénols susceptibles de se combiner avec le chlore et de donner à l'eau un goût désagréable de chlorophénols. Il oxyde rapidement les sels de fer qui peuvent ensuite précipiter sous forme d'hydroxyde ferrique insoluble. De la même façon, utilisé en excès, à des doses variables avec le pH de l'eau, il oxyde les sels de manganèse sous forme de dioxyde de manganèse

.

3.3.
MISE EN OEUVRE

Les mêmes précautions que pour le chlore doivent être prises pour obtenir un bon mélange et éviter les courts-circuits.

4. OXYDATION ET DÉSINFECTION PAR L'OZONE

4.1. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET THERMODYNAMIQUES

L'ozone est une variété allotropique de l'oxygène de formule O_3.

Sous forte épaisseur, l'ozone présente une couleur bleue caractéristique.

Masse molaire	48 g
Température d'ébullition à pression normale	(-111,9 ± 0,3) °C
Température critique	(-12,1 ± 0,1) °C
Pression critique	55,30 10^5 Pa
Enthalpie libre de formation d'une mole à - 298 K (sous 1,013 10^5 Pa)	(34220 ± 240) Cal
Densité par rapport à l'air	1,657
Masse volumique dans les conditions normales (0 °C -1,013 10^5 Pa)	2,143 kg.Nm^{-3}

4.2. OZONE ET PLASMAS

L'ozone est un gaz instable obtenu par l'activation électronique de l'oxygène. Le processus en est le suivant: l'activation électronique de l'oxygène et sa dissociation partielle sous forme d'oxygène radicalaire sont obtenues au moyen d'un champ électrique dérivant d'un potentiel

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

élevé. Ce champ électrique assure aux électrons libres ou aux électrons extraits une énergie cinétique suffisante pour assurer, par chocs successifs, l'activation de l'oxygène et sa dissociation.

A la condition que le niveau d'activation de l'oxygène ait atteint une valeur suffisante, il y a possibilité de transitions successives de cet oxygène et regrou- oxygène pement de molécules ainsi activées sous forme de molécules d'ozone.

L'état physique du milieu, tel que décrit, est caractérisé par la température "Te" et la concentration "Ne" des électrons. Ce milieu particulier est appelé plasma. Pour les plasmas, généralement induits par les décharges électriques luminescentes, l'énergie moyenne des électrons est située dans le domaine 1 à 14 eV, et la concentration électronique comprise entre 108 et 1012 électrons.cm-3 ; de plus ces plasmas sont caractérisés par un rapport entre la température des électrons "Te" et la température des molécules "Tg" compris entre 20 et 300 environ, ce qui les fait appeler **plasmas froids.**

Cette absence d'équilibre thermique des particules permet ainsi d'obtenir un milieu dans lequel les électrons possèdent suffisamment d'énergie pour entraîner l'apparition d'une variété d'espèces transitoires: ions, atomes et radicaux libres, molécules excitées, toutes très réactives chimiquement et pouvant conduire à la formation de nouvelles espèces stables, le plus souvent difficiles, sinon impossibles, à obtenir par un autre mode d'activation. Ce milieu particulier représente le quatrième état de la matière.

L'étude exhaustive des caractéristiques d'un plasma froid, paramètre par paramètre, étant impossible physiquement, il a été développé un modèle rendant compte globalement des phénomènes. Ce modèle peut être schématisé de la façon suivante (voir figure 545) où les éléments caractéristiques sont définis par

Figure 545. Activation de l'oxygène dans un plasma froid.

Vo= tension aux bornes de l'espace gazeux (potentiel de maintien de la 881 décharge).

E = champ électrique dérivant de *Vo.*

N = concentration molaire du réactant, fonction de la pression p et de la température T.

P = puissance électrique appliquée. d = largeur de l'espace de décharge. Q = débit molaire de réactant (air ou oxygène).

C = concentration en produit (ozone).

k_o = constante de vitesse apparente de formation d'ozone (directe) dépendant du champ réduit, donc de l'énergie des électrons.

k_1 = constante de vitesse apparente de destruction de l'ozone (indirecte) dépendant de la température du plasma.

Le réacteur à plasma froid de production d'ozone est un système physique à deux caractéristiques

- la caractéristique statique est le **champ réduit** (E/N), ou paramètre de TOWNSEND, qui est une mesure de l'énergie moyenne des électrons du plasma

$$E/N = Vo/Nd \quad (1)$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- la caractéristique dynamique est l'énergie disponible par molécule de réactant (gaz à l'entrée du réacteur) ou paramètre de BECKER (β)

$$\beta = P / QN \qquad (2)$$

Les données expérimentales ont permis de démontrer la validité de ce modèle, et de conclure sur le type de réacteur et de réactions mises en œuvre.

Ainsi, pour une alimentation en air, la teneur en ozone produit est obtenue par un modèle de réacteur idéal en écoulement parfaitement mélangé:

$$C = \frac{k_0 \beta}{1 + (k_0 + k_1) \beta} \qquad (3)$$

Pour une alimentation à l'oxygène, la teneur en ozone produit est obtenue par un modèle de réacteur idéal en écoulement piston:

$$C = \frac{k_0}{k_0 + k_1} [1 - e^{-(k_0 + k_1) \beta}] \qquad (4)$$

La constante de vitesse apparente k_0 de la réaction directe est sous la dépendance du champ électrique réduit et rend compte de l'effet électronique. La constante de vitesse apparente k1 de la réaction inverse est indépendante du champ électrique réduit, et il a été démontré que cette constante de vitesse suit la loi d'ARRHENIUS

$$k_1 = k_{1_0} e^{-\frac{E_{0_3}}{a\,Tg}} \qquad (5)$$

où E_{03} est l'énergie d'activation de la molécule d'ozone, Tg la température du plasma et a une constante.

Les formulations ci-dessus démontrent que la production d'ozone, ainsi que sa concentration dans le gaz vecteur, sont directement dépendantes de deux constantes cinétiques.

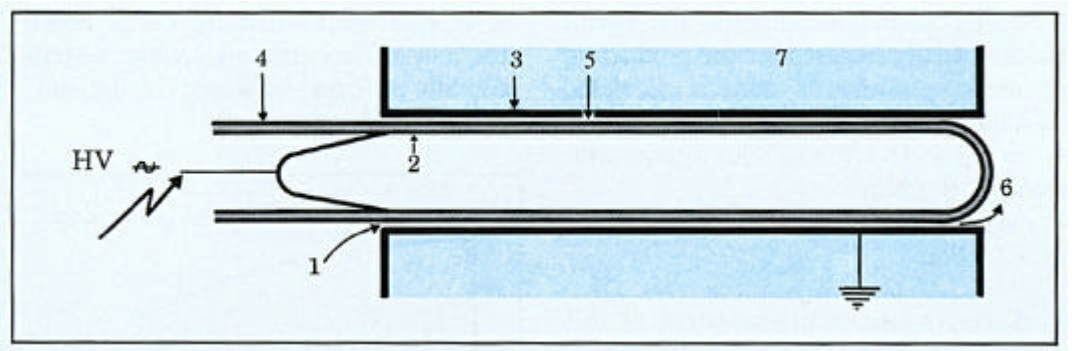
4.3. PRINCIPE DE BASE DE PRODUCTION DE L'OZONE

Industriellement (figure 546), l'ozone s'obtient en faisant passer un courant d'air ou d'oxygène (1), éventuellement un mélange des deux, entre deux électrodes (2) (3) soumises à une différence de potentiel alternative. Pour homogénéiser la décharge, et afin d'éviter l'établissement d'un régime d'arc, l'une des électrodes (2) ou parfois les deux sont recouvertes d'un diélectrique (4) d'épaisseur uniforme réalisant une surface équipotentielle. La différence de potentiel à laquelle sont soumises les électrodes est fonction de la nature et de l'épaisseur du diélectrique mis en oeuvre, ainsi que de la largeur de l'espace de décharge (5) et de la pression absolue de fonctionnement. Elle est, en pratique, comprise entre 6 000 et 18 000 V.

L'efficacité du réacteur de production d'ozone dépend essentiellement, pour une différence de potentiel donnée, des caractéristiques géométriques des éléments constitutifs du réacteur de production d'ozone, **de la température et de la pression du plasma froid.**

La production d'ozone, quant à elle, dépend essentiellement, pour un type de réacteur donné (caractéristique statique fixée), de la puissance absorbée et du débit du gaz vecteur transitant. Selon le cas, à partir des équations (3) ou (4), on peut déterminer la concentration de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Entrée d'air ou d'oxygène. 2-3 - Électrodes. 4 - Diélectrique 5 - Espace de décharge. 6 - Air ou oxygène + ozone. 7 - Eau de refroidissement.
Figure 546. Ozoneur tubulaire élémentaire.

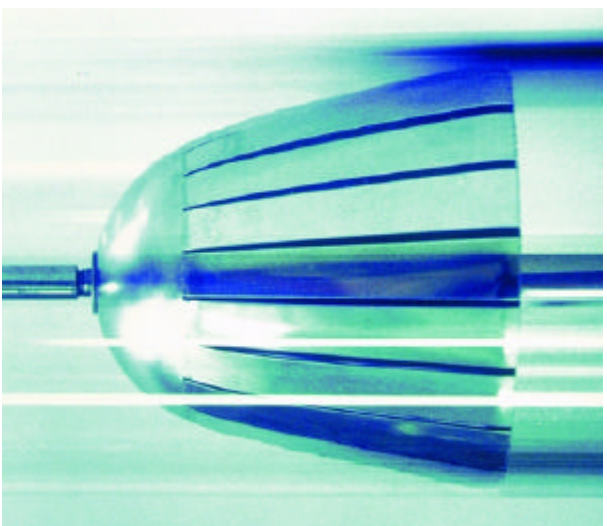
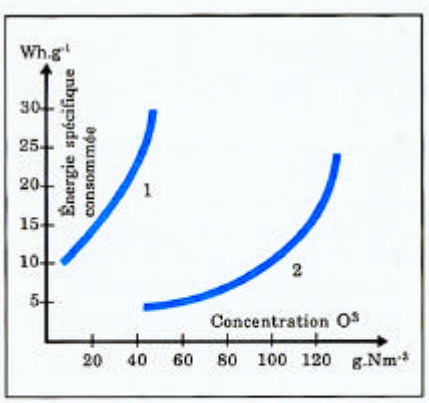


Figure 547. Extrémité d'un tube d'ozoneur avec son système de connexion électrique.

l'ozone produit, puis la production elle-même et, connaissant la puissance absorbée par le réacteur, son efficacité.

Les concentrations usuelles en ozone dans le gaz vecteur sont habituellement comprises entre
- 10 à 40 g.Nm^{-3} dans le cas d'utilisation de l'air,
- 10 à 140 g.Nm^{-3} dans le cas d'utilisation de l'oxygène (voir figure 548).

Pour ces gammes de concentration, et sous réserve d'une dessication poussée de l'air ou de l'oxygène ou du mélange des deux **(point de rosée compris entre -60°C et -80 °C),** la production des ozoneurs actuels, suivant les types et la



1 – Avec air. 2 – Avec oxygène.
Figure 548. Énergie spécifique consommée en fonction de la concentration de l'ozone produit en [illegible] par un réacteur optimisé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

nature de gaz vecteurs utilisés, est comprise entre 68 g et 430 g par mètre carré de surface diélectrique et par heure.

Dans les conditions usuelles d'utilisation, l'énergie spécifique utile pour la production d'un kilogramme d'ozone s'établit comme suit

- air: 13 à 18 $kWh.kg^{-1}$ à une concentration de 18 $g.Nm^{-3}$
- oxygène: 6 $kWh.kg^{-1}$ à une concentration de 70 $g.Nm^{-3}$

Une partie très importante de cette énergie est dégradée sous forme de chaleur qui vient augmenter la température du plasma de façon très significative.

Comme on peut le vérifier à partir de la formule (5), le rendement global de la conversion oxygène - ozone est fonction de la température. Toute augmentation de cette dernière conduit inéluctablement à dégrader le rendement global de l'opération; c'est pourquoi il faut évacuer en continu la chaleur produite et maintenir, autant que faire se peut, le plasma isotherme (figure 549). Ceci implique un refroidissement efficace du réacteur de production d'ozone. Ce refroidissement se fait généralement par circulation d'eau

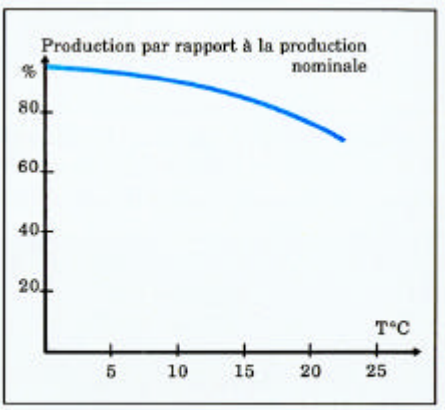


Figure 549. Production d'ozone en fonction de la température de l'eau de refroidissement.

4.4. DOMAINES D'UTILISATION

L'action de l'ozone peut être recherchée pour:

Eaux de consommation

- l'amélioration des qualités organoleptiques (couleur, seuil de dégustation),
- l'action bactéricide et virulicide,
- l'oxydation des matières organiques, - l'oxydation de micropolluants,
- l'oxydation de métaux en solution (déferrisation - démanganisation),
- et l'amélioration de la biodégradabilité avant charbon actif en grains, ...

Piscines

- l'amélioration des qualités visuelles,
- la mise en place d'une barrière virulicide dans le circuit de régénération, *
- la dégradation de certaines substances aminées.

Eaux industrielles

- l'oxydation sous toutes ses formes,
- la détoxication,
- la décoloration,
- la désodorisation,
- l'amélioration éventuelle de la biodégradabilité avant traitement biologique.

Eaux usées urbaines

- la désinfection d'eaux usées préalablement épurées, en particulier associée à un traitement par boues activées à l'oxygène pur,
- la désodorisation, en particulier du traitement des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.5.
DISSOLUTION DE L'OZONE

4.5.1 Généralités sur le transfert de l'ozone

On admet généralement que la dissolution de l'ozone suit la loi de HENRY.

Les quantités d'ozone dissoutes dépendent de la température de l'eau et de la pression d'application du gaz.

Les travaux ont démontré que la détermination du coefficient de solubilité présente des difficultés, car l'ozone a la propriété de se décomposer facilement en milieu aqueux. Cette décomposition est accélérée par deux facteurs:

- une augmentation de la température,
- une augmentation dupes, par suite de la présence de l'ion hydroxyle (voir figure 550).

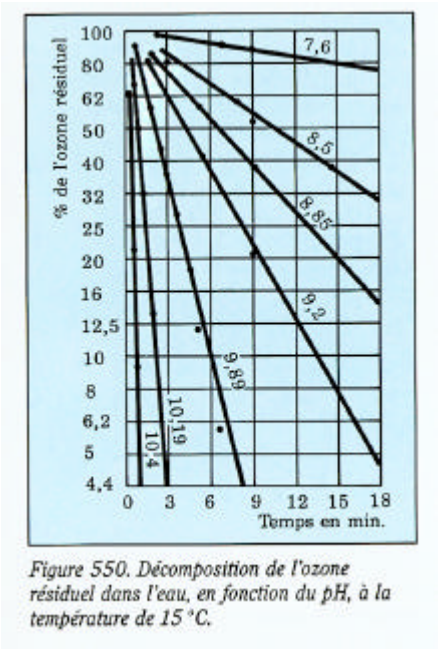


Figure 550. Décomposition de l'ozone résiduel dans l'eau, en fonction du pH, à la température de 15 °C.

L'ozone est préparé sur le site d'utilisation, il est présent dans un gaz vecteur sous forme diluée. De ce fait, la pression partielle de l'ozone dans le mélange est faible. Le coefficient d'absorption (HENRY), qui s'applique normalement à tous les gaz purs et homogènes, n'offre donc, dans ce cas, qu'un intérêt limité, et ne peut être utilisé sans avoir recours à des calculs compliqués.

Pour caractériser de façon simple le transfert de l'ozone, on préfère avoir recours à l'utilisation d'un coefficient mesurable expérimentalement. Ce coefficient m est appelé coefficient de partage. Il représente le rapport entre la concentration de l'ozone dans le gaz vecteur, air ou oxygène, mis en contact avec l'eau et la concentration de l'ozone dans l'eau.

$$m = \frac{C_{gaz}\ mg.l^{-1}}{C_{eau}\ mg.l^{-1}}$$

Lorsque l'équilibre de dissolution est atteint, la concentration d'ozone dissous équivaut à 1/m fois la concentration de l'ozone dans le gaz vecteur.

La figure du chapitre 8, page 514 donne la variation de la solubilité de l'ozone (à saturation) dans l'eau en fonction de la température et de la teneur en *03* du gaz vecteur.

En système simple, et en ne considérant que le transfert de l'ozone à l'interface gaz - liquide, le critère prépondérant permettant la dissolution de l'ozone est la pression partielle de l'ozone dans le gaz vecteur, donc dans le mélange. La pression partielle est le produit de la concentration de l'ozone par la pression d'application.

La figure 551 montre l'effet de la pression d'application sur la solubilité de l'ozone à température ambiante de 15 °C.

A la différence de très nombreux autres transferts gaz - liquide, la dissolution de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

l'ozone s'effectue à partir d'un gaz vecteur pauvre en ozone (au plus 10 % dans le cas de (oxygène pur).

Dans la pratique, les concentrations saturantes C_S sont très loin d'êtres atteintes; la figure 552 représente les concentrations couramment atteintes et montre un palier au-delà d'une certaine concentration dans le gaz vecteur.

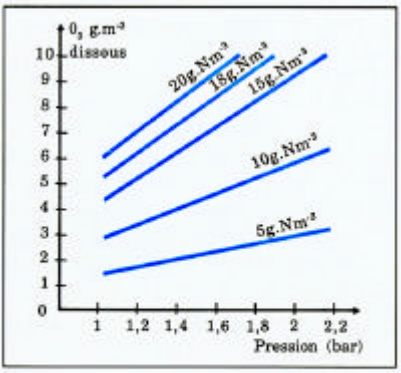


Figure 551. Influence de la pression et de la concentration du gaz vecteur sur la solubilité de l'ozone à 15 °C.

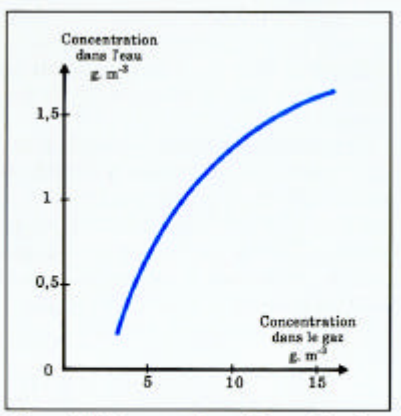


Figure 552. Concentrations d'ozone dans les conditions pratiques d'équilibre, à la pression atmosphérique.

4.5.2. Aspects théoriques du transfert de matière

Le traitement d'ozonation consiste à assurer le transfert de l'ozone en phase gazeuse vers la phase liquide, par diffusion à travers une interface gaz/eau.

Les études successives effectuées par DEGRÉMONT ont permis de développer et de préciser l'influence des différents paramètres régissant ce transfert.

La matière (ozone) est transférée à travers une interface. Dans le cas de (absorption, le gaz soluble (ozone) doit tout d'abord diffuser à la surface, puis se dissoudre dans le liquide et, par la suite, diffuser au sein même du liquide. La vitesse de transfert entre les phases (gaz-liquide) dépend:

- des propriétés physiques des deux phases,
- de la différence de concentration de chaque côté de faire interfaciale,
- du degré de turbulence.

Le modèle le plus représentatif des conditions de transfert à l'interface est le modèle qui développe la théorie de la double couche (figure 553) déjà présenté à la page 276 du chapitre 3.

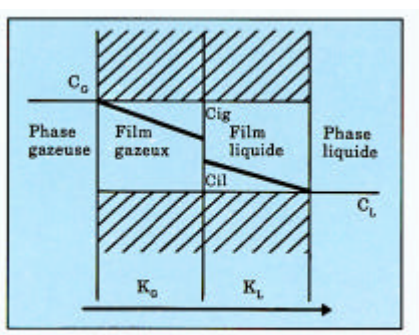


Figure 553. Modèle de transfert de l'ozone.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'équation de transfert s'écrit:

$$\left[\begin{array}{l}\text{Quantité transférée}\\ \text{par unité de temps}\end{array}\right] = \left[\begin{array}{l}\text{Coef. de}\\ \text{transfert}\end{array}\right] \times \left[\begin{array}{l}\text{Surface}\\ \text{d'échange}\end{array}\right] \times \left[\begin{array}{l}\text{Potentiel}\\ \text{d'échange}\end{array}\right]$$

Quantité transférée par unité de temps = Coef. de transfert * Surface d'échange * Potentiel d'échange

Le potentiel d'échange dépend, dans ce cas, non seulement de la différence de concentration entre gaz et liquide, mais aussi de la réactivité directe chimique de l'ozone sur les polluants.

4.5.3. Absorption avec réactions chimiques

L'ozone réagit avec de nombreux constituants organiques présents dans l'eau (composés organiques, virus, bactéries...), il est intéressant de savoir si ces réactions augmentent ou non la quantité d'ozone transférée, et pour cela, il est utile de déterminer un facteur d'accélération, défini par le rapport quantité d'ozone transférée avec réaction sur quantité d'ozone transférée sans réaction. On peut envisager plusieurs hypothèses selon la vitesse de réaction.

- **Réactions "très lentes"**

Très peu d'ozone est consommé; le liquide reste pratiquement saturé par le gaz qui n'a pas réagi. La vitesse de réaction dans le liquide est indépendante de la quantité d'ozone transférée. Il n'y a pas de réaction chimique dans le filin.

- **Réactions "lentes"**

Une faible quantité d'ozone est transférée de la phase gazeuse à la phase liquide. Le transfert est, dans ce cas, également limité par la vitesse de réaction dans la phase liquide.

- **Réactions rapides**

Tout (ozone réagit dans le filin côté liquide, la concentration en ozone dans le liquide est quasiment nulle. C'est la réaction chimique qui contrôle le transfert (réaction de l'ozone sur l'iode par exemple). Ce type de réaction est mis en jeu lors de l'ozonation d'éléments minéraux (fer, manganèse). Le facteur d'accélération dépend, non seulement de la cinétique de la réaction en phase liquide, mais aussi de l'hydrodynamique du système de contact ozone eau.

Compte tenu des concentrations en produits organiques présents dans les eaux de surface ou dans les eaux résiduaires, et au vu des vitesses de réaction relativement lentes, on peut conclure que:

- pour les eaux de surface, on a généralement des réactions au sein du liquide,
- pour les eaux profondes, dans le cas de déferrisation ou démanganisation, les réactions sont souvent à l'interface,
- pour les eaux résiduaires, on peut avoir dans certains cas des réactions combi- 887 nées dans le filin côté liquide et au seinmême du liquide.

4.5.4. Choix des réacteurs de mise en contact

Dans le cas de cinétique chimique rapide, le transfert de l'ozone est le facteur limitant. On peut alors faire appel à des réacteurs à fort coefficient de transfert tels que colonnes à garnissage ou tubes en U.

Dans le cas de cinétique chimique lente, celle-ci est le facteur limitant On utilise plutôt alors des réacteurs à dispersion de bulles (agités ou non mécaniquement).

Toutefois, les rendements de dissolution de (ozone sont toujours très élevés (70 à 98 %) et très supérieurs à ceux de la dis solution de l'oxygène de l'air.

Diffusion par dispersion de bulles

L'équation générale de transfert montre

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

que la quantité d'ozone absorbée augmente avec:

- la différence de concentration entre les deux phases; la vitesse d'absorption est donc maximale à la formation de la bulle, - le temps de séjour des bulles dans le liquide (donc avec la hauteur d'eau),
- le rapport $\frac{\text{surface développée par les bulles}}{\text{volume d'eau}}$

Une règle pratique permet d'estimer la surface totale St développée par un N1 de gaz divisé en bulles de diamètre d :

St en m^2 = 0,006 / d en m

La production de bulles très fines exige les plus fortes énergies (voir cas de la flottation avec air pressurisé). Dans le cas de l'ozonation, l'expérience montre que le diamètre optimal des bulles est de l'ordre de 3 mm. Leur vitesse ascensionnelle est, dans ce cas, de 20 à 30 $cm.s^{-1}$.

4.5.5. Réacteurs

Le nombre d'étages en série dépend des cinétiques d'oxydation des polluants à éliminer.

Dans le cas de cinétiques très lentes ou lentes, le résiduel d'ozone apparaît bien avant la fin de la réaction: dans ce cas afin de maintenir ce résiduel pendant le temps nécessaire à la réaction, il est avantageux d'augmenter le nombre d'étages. Dans le cas de cinétiques rapides, on peut se contenter d'un seul réacteur.

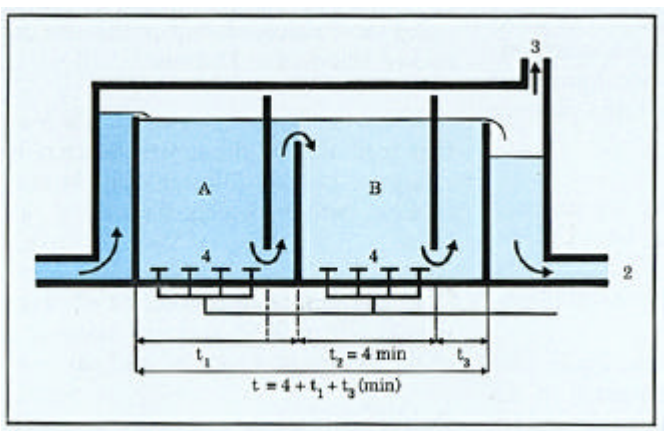
4.5.5.1. Réacteurs équipés de diffuseurs poreux

Ces réacteurs sont composés d'un ou plusieurs compartiments, placés en série, et parcourus par le flux d'eau à traiter. Des diffuseurs poreux, placés à la base de chacun des compartiments, assurent une division du gaz ozoné en très fines bulles. L'eau à traiter est généralement admise à la partie supérieure (figure 554), on obtient ainsi un contact intime, à contre-courant, des deux phases.

L'ozone peut être injecté dans l'un ou l'autre des compartiments qui devront être, de préférence, parcourus à contre-courant.

Les diffuseurs poreux sont de type à disque DP 230 (voir page 705).

Dans ce type de réacteur, les hauteurs d'eau au-dessus des poreux doivent être comprises entre 5 et 7 m. En préozona-



1 - Entrée d'eau.
2 - Sortie d'eau
3 - Évent ou destruction.
4 - Injection de gaz ozone. A-B -Compartiments de contact
Figure 554. Exemple de réacteur à deux compartiments pour la désinfection en EP.

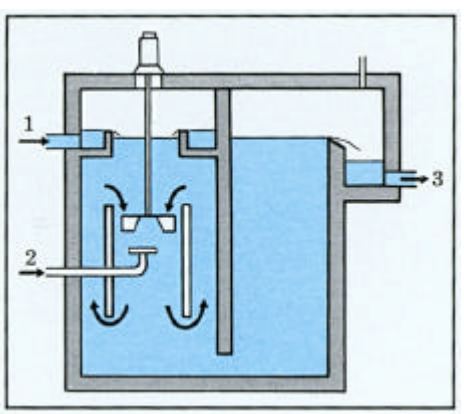
Downloaded from https://hydraulicsnotblogspot.com/

tion, il peut apparaître, dans certains cas, des mousses à la surface du liquide. Les mousses, où se concentre une partie des polluants (détergents, algues...), peuvent être évacuées séparément.

4.5.5.2. Réacteurs équipés de turbines

Deux cas peuvent se présenter. Dans le premier cas, l'eau à traiter est introduite dans la zone d'aspiration d'une turbine qui la refoule vers le bas à la rencontre d'un flux de gaz ozoné insufflé au-dessous d'elle. Une émulsion fine gaz vecteur ozoné/eau se diffuse dans la totalité de la partie amont de la tour de contact et est reprise par la turbine, dont le débit de recyclage représente plusieurs fois le débit d'eau à traiter (figure 555). Le profil de la turbine doit être spécialement étudié pour provoquer le cisaillement des bulles de gaz ozoné et assurer ainsi une bonne diffusion du mélange gazeux dans le liquide.

Dans le second cas, on utilise une turbine avec moteur immergé reposant sur le fond du compartiment du réacteur. Le profil spécial de l'impulseur de cette turbine permet d'aspirer le débit de gaz ozoné et, simultanément, un certain débit d'eau, et expulse une émulsion riche en fines bulles. Ces turbines, spécialement développées pour assurer une diffusion gazeuse, sont calculées, à la demande, en fonction de la profondeur d'immersion, du débit de gaz ozoné à diffuser et du taux de recirculation d'eau. Leur rendement de transfert est excellent à leur débit nominal; elles peuvent travailler, dans de bonnes conditions, sur des eaux relativement chargées, ce qui les prédispose à une utilisation en préozonation. La vitesse de rotation de la turbine doit être adaptée au débit d'air ou d'oxygène ozoné à introduire. Le nombre et la position des turbines sont très dépendants de l'hydraulique du bassin.



1 - Arrivée d'eau.
2 -Arrivée d'air ozoné.
3 -Sortie d'eau ozonée
Figure 555. Tour de contact avec turbine.

4.5.5.3. Tube en U

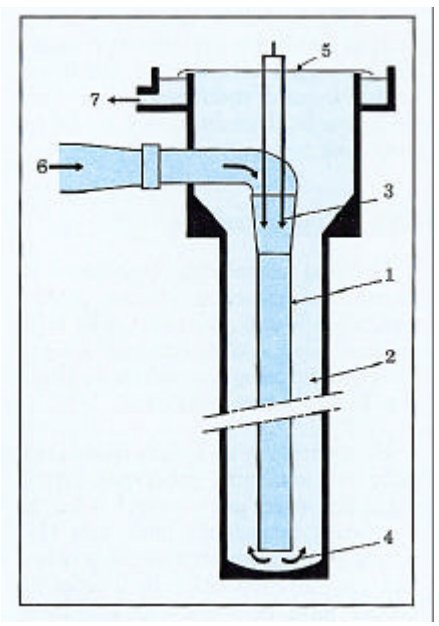
C'est le réacteur qui répond aux critères, dénis en génie chimique pour assurer le meilleur transfert gaz ozoné-liquide : forte pression d'application et grandes surfaces d'échange. C'est un réacteur à flux piston (figure 556).

Réalisé normalement à l'aide de deux tubes concentriques, il comprend une partie descendante (1) dans laquelle est introduit le gaz ozoné et dispersé, soit par un système de cannes à injection, soit par un système assurant la diffusion sous forme de fores bulles (3). Après injection du gaz ozoné, l'émulsion créée descend vers le fond du tube en U; durant ce parcours la pression d'application augmente continuellement en fonction de la hauteur du tube. Au fond du tube en U (4), l'émulsion gaz - liquide est excellente et le diamètre des bulles très petit, ce qui entraîne une très grande surface d'échange. Après sortie du tube descendant, l'émulsion remonte à la périphérie du tube dans la

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

zone annulaire (2). Dans cette zone, au fil de la remontée, le diamètre des bulles augmente jusqu'à la surface libre (5).

Les paramètres caractéristiques du dimensionnement d'un tube en U, qui est un système diphasique, sont - la vitesse de descente de l'émulsion dans le tube central, - le rapport G/L du débit du gaz au débit du liquide exprimé en %, - la perte de charge totale du système en régime diphasique.



1 - Branche descendante.
2 - Branche ascendante.
3 - Injection du gaz ozoné.
4 -Zone d'inversion de circulation.
5 - Surface de sortie.
6 - Entrée d'eau à traiter.
7 - Sortie d'eau traitée.
Figure 556. Schéma de principe du tube en U.

A titre indicatif, les vitesses de descente, rapportées au seul débit d'eau, sont comprises entre 1,6 et 1,8 $m.s^{-1}$, le rapport G/L maximal est de 17 %.

C'est un réacteur qui est parfaitement bien adapté pour travailler en préozonation (pas de risque de dépôt) et avec de fortes concentrations en ozone dans le gaz vecteur.

Pour assurer de façon correcte, en régime diphasique à débit variable, la circulation de l'émulsion, et vaincre les pertes de charges engendrées par un tel système, le tube en U doit être équipé d'une pompe.

4.5.5.4. Réacteurs particuliers

Pour certaines applications, dans le traitement des eaux ou dans d'autres domaines, on peut utiliser des types de réacteurs différents, qui seront calculés en fonction des cinétiques des réactions à obtenir et de la nature des produits à traiter. Ce peuvent être, par exemple, des réacteurs gaz - liquide sous pression, des réacteurs gaz - solide, voire des réacteurs triphasiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

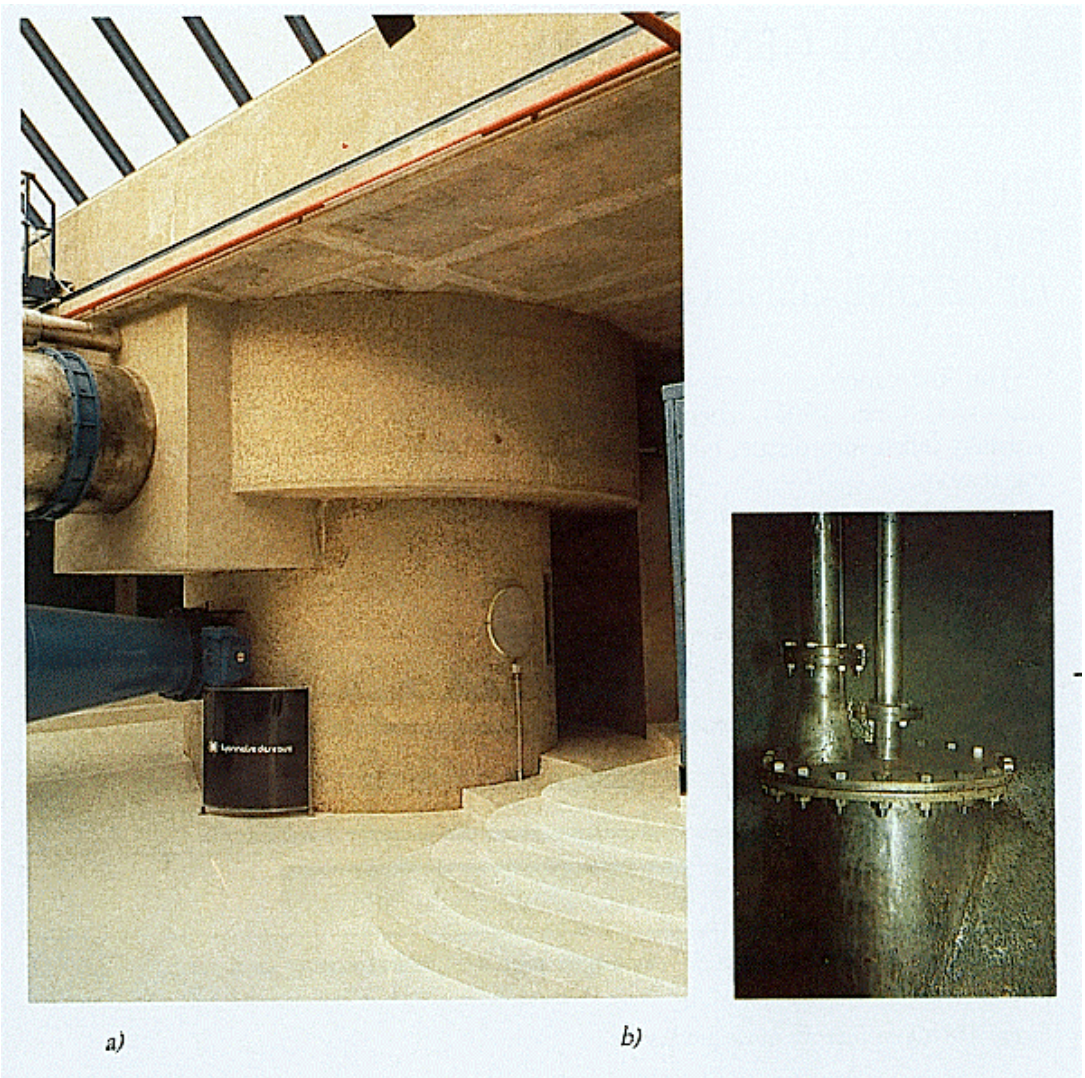


Figure 557. Installation du PECQ (Yvelines) pour la Lyonnaise des Eaux. Débit: 1500 $m^3.h^{-1}$ Ozonation d'eau nitrifiée avant filtration sur CAG. Tube en U. a - La tête de puits. b - La tête d'injection.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

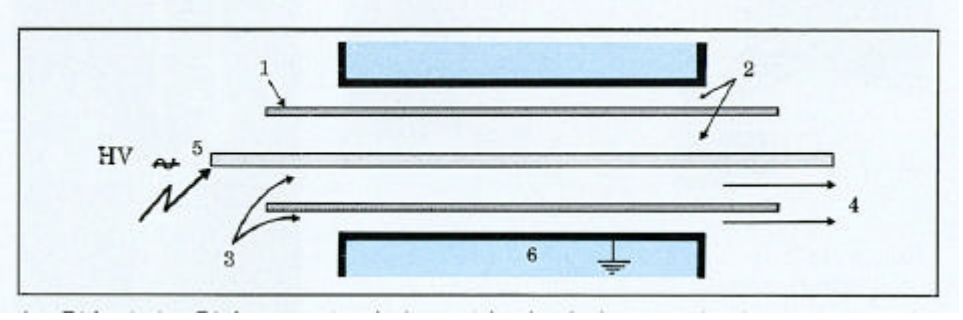
5. LES OZONEURS

5.1 DIFFÉRENTS TYPES D'OZONEURS

Les ozoneurs à plaques, qui ont été les premiers utilisés (OTTO, 1906), sont pratiquement abandonnés pour les raisons suivantes

- faible production par unité de surface d'électrode,
- faible pression de fonctionnement, - refroidissement difficile,
- construction peu fiable (étanchéité).

Il n'existe actuellement qu'un seul type d'appareil de production d'ozone, qui est le type tubulaire. Les ozoneurs à **tubes diélectriques ouverts** (figure 558), où la décharge est fractionnée en deux décharges successives (2) avec interposition d'un diélectrique (1), ne permettent pas d'augmenter la production volumique et sont difficiles à refroidir. Les ozoneurs à **tubes diélectriques fermés,** où la décharge est créée en un seul stade entre la paroi du diélectrique porté à haute tension et l'électrode de masse métallique, sont les plus performants.



1 - Diélectrique. 2 - Espaces de décharge. 3 - Entrée d'air ou d'O, 4 - Sortie (d'air ou d'O_2) + O_3.5 -Électrode HT. 6 - Électrode de masse.
Figure 558. Schéma de tube ouvert pour production d'ozone.

5.2. OZONEURS TUBULAIRES A TUBES DIÉLECTRIQUES FERMÉS

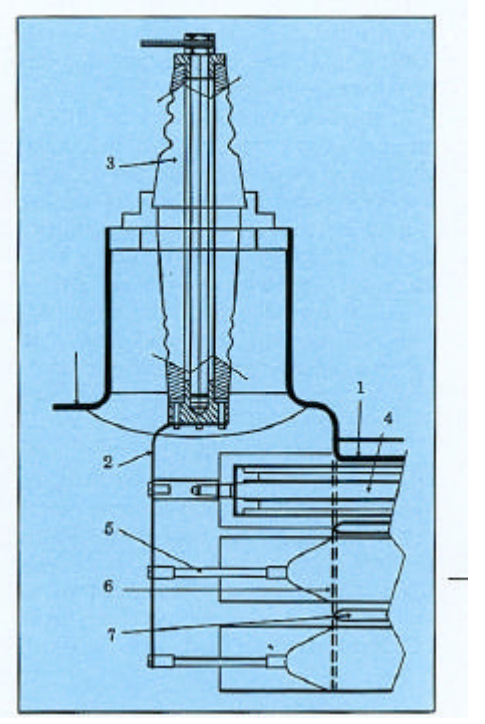
Un élément d'ozoneur tubulaire (figure 559) est constitué de deux électrodes concentriques (2) (3) et d'un tube diélectrique (4). C'est le type d'ozoneur le plus répandu. Dans les ozoneurs tubulaires horizontaux DEGRÉMONT, chaque élément comprend un tube en acier inoxydable (3) dont la périphérie est refroidie par circulation d'eau. Ce tube métallique est relié directement à la masse, l'autre électrode est constituée d'un tube diélectrique (4) fermé à une extrémité et dont la face interne est revêtue d'une couche d'aluminium pur (2) déposée par chalumeau à plasma. Ce revêtement interne d'alumi-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

nium constitue l'électrode haute tension qui est reliée à la borne haute tension HT d'un transformateur élévateur de tension.

La formation de l'ozone a lieu dans l'espace annulaire (5). Le centrage des tubes diélectriques dans leurs tubes métalliques respectifs se fait à l'aide de centreurs en acier inoxydable (6) assurant un centrage parfaitement coaxial et ménageant un espace de décharge constant (5). Dans cette configuration, le tube diélectrique n'est soumis à aucune contrainte mécanique du fait des variations de température.

Chaque tube diélectrique est alimenté en haute tension par l'intermédiaire d'un dispositif spécial (7), assurant tout à la fois la jonction entre la source haute tension et le revêtement interne d'aluminium, ainsi que l'homogénéisation du champ électrique en bout de tube, afin d'éviter les concentrations de lignes de champ à l'arrêt de la métallisation, et les possibilités de décharges parasites (aigrettes) au droit des concentrations des lignes de champ (effet de pointe). Les décharges parasites en bout de tubes consomment de (énergie, dissipée en pure perte, et qui ne participe pas à la fabrication de l'ozone. Un tel dispositif d'alimen-



1 - Corps de 1'ozoneur. 2 - Bande d'alimentation HT des tubes. 3 - Borne HT. 4 -Conducteur du transfert. 5 - Fusible. 6 Plaque tubulaire. 7 - Eau de refroidissement.

Figure 560. Dispositif d'alimentation électrique d'un ozoneur DEGRÉMONT

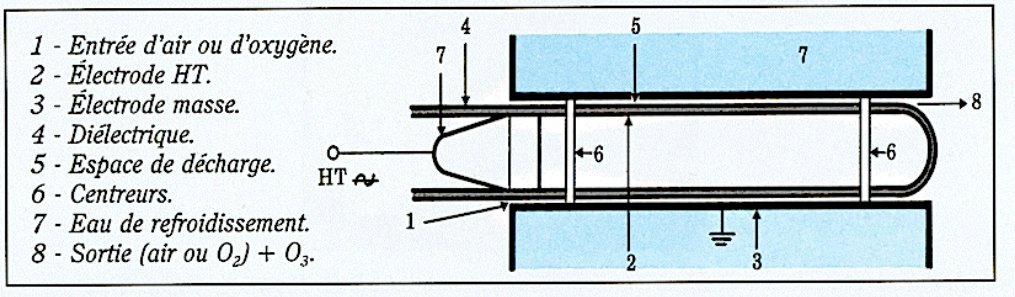


Figure 559. Schéma du tube diélectrique fermé d'un ozoneur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tation permet un gain en énergie de l'ordre de 16 %.

Le dispositif décrit ci-dessus peut être relié à la source haute tension par l'intermédiaire d'un tube de jonction (petits ozoneurs) ou d'un fusible haute tension individuel permettant l'isolement d'un tube en défaut pendant que les autres tubes diélectriques restent en fonctionnement. Les tubes de jonction ou les fusibles sont reliés entre eux à l'aide de bandes perforées au pas (fig. 560). Les contacts entre les différentes pièces sont réalisés par vissage, le métal constitutif de ces différentes parties étant l'acier inoxydable. Cette technique permet d'assurer des contacts francs, sans résistance parasite due à l'oxydation, et diminue les pertes totales du système.

Les appareils fonctionnent sous pression d'air ou d'oxygène et doivent être parfaitement étanches. Le point le plus critique d'un ozoneur de type tubulaire est la jonction tube métallique-plaque tubulaire. En effet, si le type de construction n'est pas soigneusement étudié, il est possible d'avoir à cet endroit des points de fragilisation concernant la tenue des appareils en pression, ou la possibilité de corrosions chimiques par dépôts (concentration en chlorures).

Les aciers inoxydables présentent en effet une grande susceptibilité aux corrosions par les chlorures. Toute zone de repli ou de cavité artificielle, où l'eau de refroidissement peut stagner, présente des risques de concentration en chlorures, de dépôts et de percements par corrosion. La jonction plaque tubulaire/tube acier inoxydable doit assurer une homogénéité constante du métal (zone de soudure), l'absence de repli ou de cavité, l'absence d'écrouissage du métal durant les opérations de fabrication. DEGRÉMONT a mis au point un système de soudage automatique des plaques tubulaires et des tubes acier inoxydable sans métal d'apport, et répondant parfaitement aux critères ci-dessus. Cette technique de fabrication, alliée à un parfait traitement de l'acier inoxydable après fabrication (nettoyage, dégraissage, décapage, déconta-

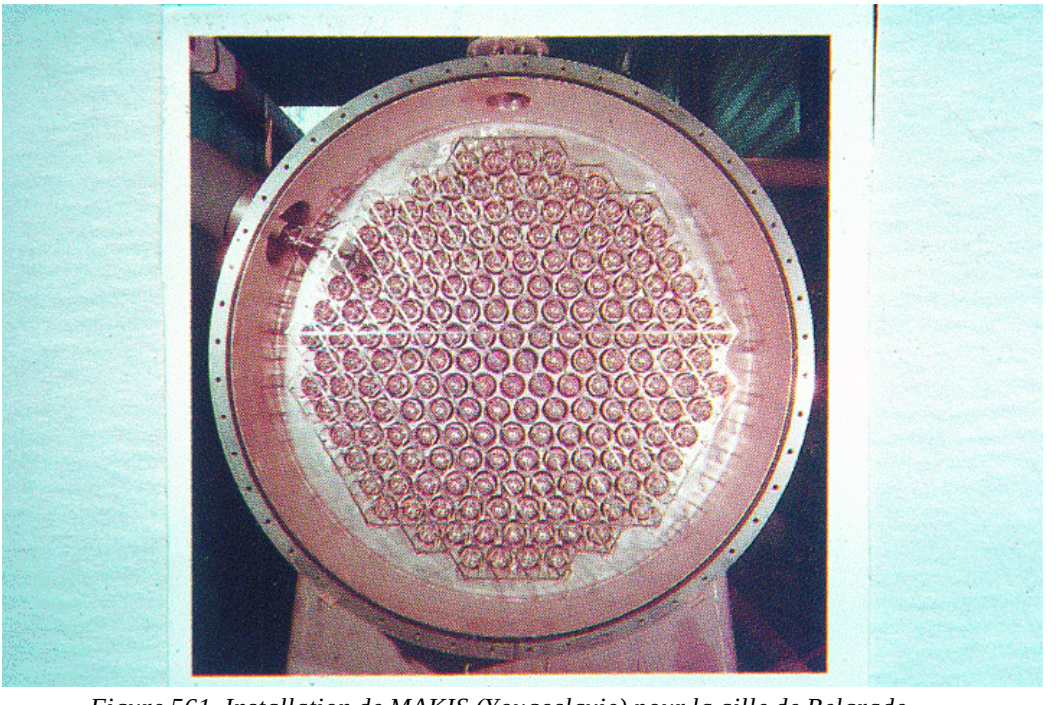


Figure 561. Installation de MAKIS (Yougoslavie) pour la aille de Belgrade. Capacité de production: 14, 5 X 3 = 43,5 kg.h^{-1}. Vue d'un appareil ouvert

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

mination, passivation et rinçage par immersion totale dans des bains de traitement contrôlés), permet d'obtenir une qualité de fabrication et une passivation de l'acier inoxydable assurant une technique irréprochable.

Un corps d'ozoneur est constitué par la mise en parallèle de dispositifs unitaires (figure 562) tels que décrits précédemment Son refroidissement efficace doit être assuré pour maintenir isotherme le plasma DEGREMONT a étudié et développé un système de refroidissement supprimant les zones mortes, avec un système de répartition et de reprise dont la disposition a été modélisée sur maquette et par calcul.

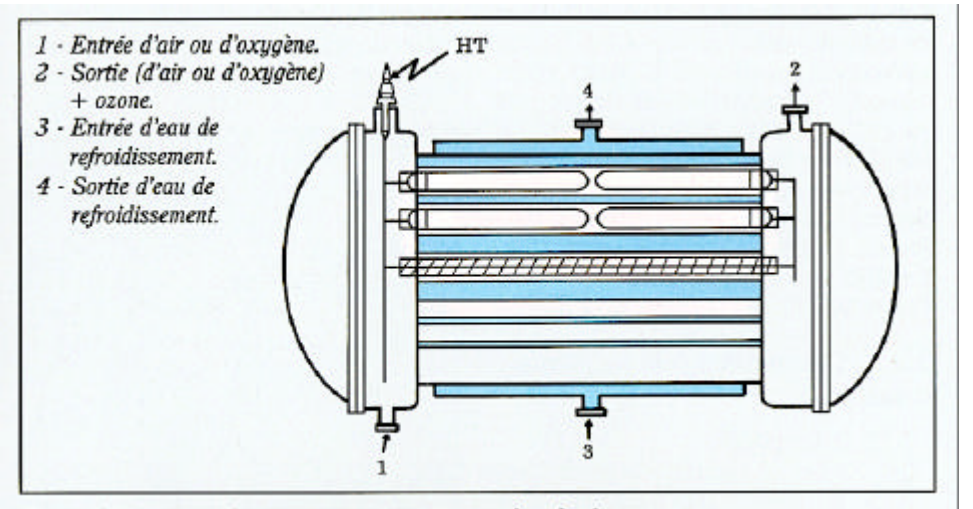


Figure 562. Schéma d'ozoneur avec circuit interne de refroidissement.

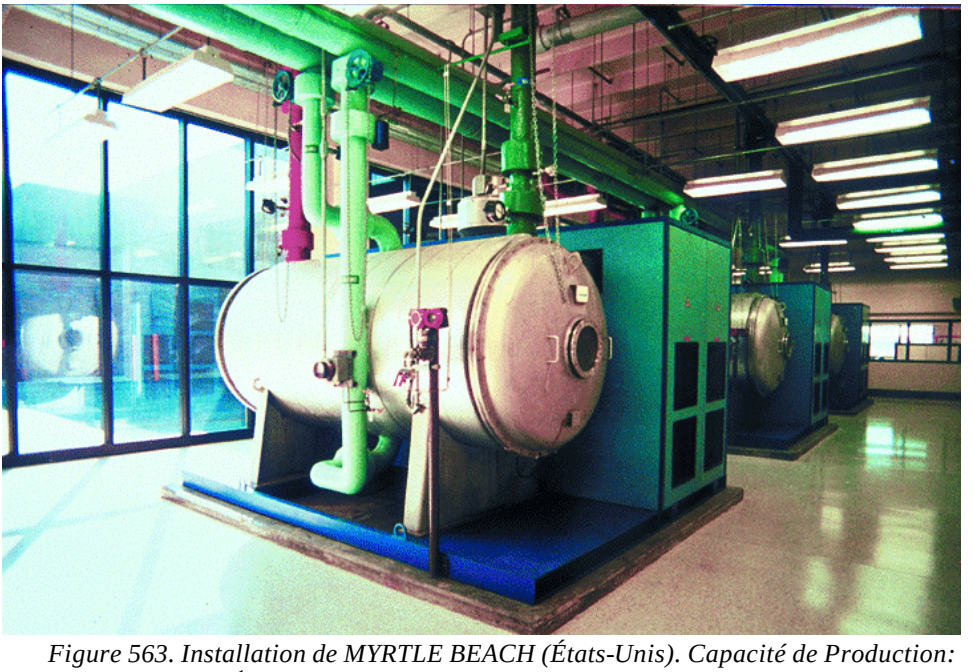


Figure 563. Installation de MYRTLE BEACH (États-Unis). Capacité de Production: 3 X 14 = 42 kg.h^{-1}. Ozonation d'eau de surface. Ozoneurs type MBF 280.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.3. ALIMENTATION ÉLECTRIQUE DES OZONEURS

Selon la quantité d'ozone à produire, deux possibilités sont offertes pour l'alimentation électrique des ozoneurs. Pour les quantités inférieures à 7 kg d'ozone par heure et par appareil, la fréquence du courant d'alimentation électrique est celle du réseau de distribution: 50 ou 60 Hz. Pour des quantités d'ozone plus importantes, il est plus économique d'alimenter les ozoneurs en moyenne fréquence, à partir d'un convertisseur statique délivrant une fréquence du courant d'alimentation de l'ordre de 600 Hz.

5.3.1. Alimentation à la fréquence

5.3.1.1. Description

Dans ce cas, la variation de production d'ozone est obtenue par modification de la puissance absorbée, elle-même obtenue en réglant la tension appliquée soit par bonds, soit de façon continue.

Dans le cas d'une **variation par bonds,** (figure 564 a), un commutateur (1) permet d'appliquer la tension du réseau à des prises déterminant des rapports de transformation différents (2). Dans le cas de la **variation continue** (figure 564 b), un autotransformateur variable (1) permet d'ajouter ou de soustraire, par l'intermédiaire d'un transformateur série (2), une tension de réglage à la tension du réseau (3).

La tension obtenue aux bornes du primaire du transformateur élévateur de tension est ainsi continûment variable de la même façon que la tension secondaire appliquée à l'ozoneur.

La variation continue peut également être obtenue à l'aide d'un système DEGRÉMONT totalement statique, appelé **Inductance à Saturation Variable (ISV)** (figure 564 c). Le courant alimentant l'ozoneur est réglé en continu par modification statique de l'impédance présentée par l'ISV (1). Dans le cas où le courant de contrôle est nul, le courant circulant dans le circuit primaire est limité, en valeur absolue, à celle du courant

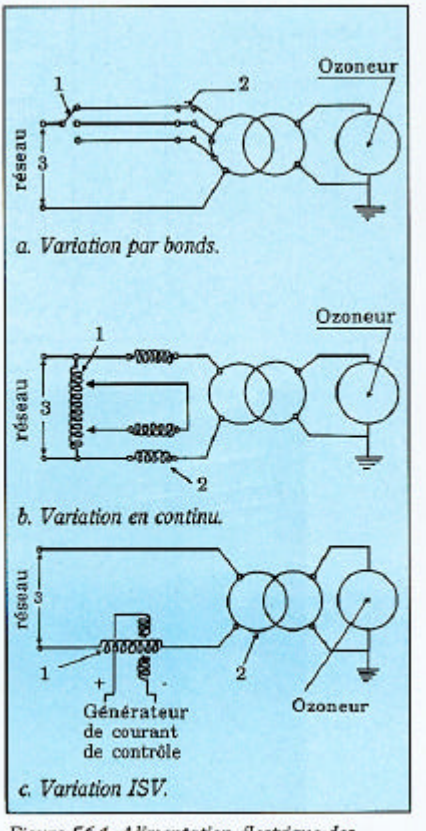


Figure 564. Alimentation électrique des ozoneurs à fréquence industrielle 50 ou 60 Hz.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

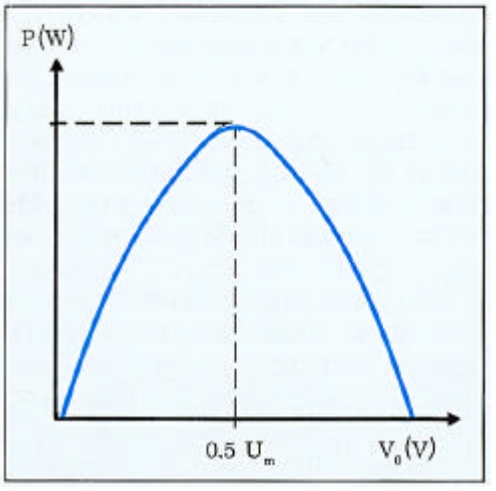


Figure 565. Puissance absorbée par un ozoneur en fonction de la tension.

magnétisant de l'ISV (courant faible). Au fil de la variation du courant de contrôle, l'ISV se sature et le courant circulant dans le circuit primaire est fonction du degré de saturation de l'ISV. A saturation magnétique complète de l'ISV par le courant de contrôle, le courant primaire circulant est limité par l'impédance propre du circuit comportant l'ozoneur, vue du primaire du transformateur haute tension (2).

5.3.1.2. Critères de dimensionnement

La puissance absorbée par un ozoneur est directement liée à la valeur de la tension aux bornes de l'espace gazeux. Cette tension, est elle-même liée au produit NA (de la concentration moléculaire "N" par la largeur "d" de l'espace d'ionisation) fixant la caractéristique statique du réacteur et, par suite, ses performances.

Sur la figure 565, on voit que la puissance absorbée présente une valeur maximale lorsque la tension V° aux bornes de l'espace gazeux vaut approximativement 0,5 fois la valeur de crête de la tension totale aux bornes de l'ozoneur. Pour un ozoneur donné, cette condition peut ne pas correspondre à la production maximale.

Aussi, pour l'alimentation 50 ou 60 Hz, faut-il mieux rechercher une conception d'ozoneur privilégiant à la fois l'investissement et la consommation spécifique.

Le facteur de puissance d'un ozoneur étant faible, de l'ordre de 0,5 avant (charge non linéaire capacitive), une compensation inductive est prévue, qui porte le facteur de puissance de l'ensemble, vu du réseau, à une valeur comprise entre 0,9 et 0,95 avant, réduisant ainsi la puissance installée requise par l'appareil, exprimée en kVA.

5.3.2. Alimentation en moyenne fréquence (MF)

Quelques fabricants de générateurs d'ozone ont eu dans le passé l'idée d'assurer l'alimentation des réacteurs de production d'ozone en MF, afin d'augmenter la puissance massique des appareils et d'en accroître la production.

DEGRÉMONT a fait reposer le développement des ozoneurs MF non seulement sur l'étude des problèmes purement électrotechniques, mais également sur la connaissance préalable de la génération d'ozone dans un plasma froid (voir p. 880). Une modélisation permet d'établir les paramètres fondamentaux régissant le générateur.

Ces paramètres caractéristiques permettent de proposer des réacteurs performants **tant** pour la production d'ozone que pour la consommation énergétique, et qui bénéficient des avantages de la MF. La production horaire par tube diélectrique installé est multipliée par un facteur 3,4 comparée à celle d'un générateur 50 Hz fournissant l'ozone à la même concentration dans l'air. L'énergie spécifique est réduite de 26 dans les mêmes conditions.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

DEGRÉMONT a ainsi développé, seul, puis en association, un convertisseur statique parfaitement adapté à l'alimentation des ozoneurs (figure 5 66). Ce convertisseur statique est principalement composé d'un système de redressement triphasé double alternance (1) avec découplage du réseau (2), de type pont de GRAETZ, commandé par thyristors, suivi d'un système de filtrage et de lissage de type LC (3) avec possibilité de déballastage de l'énergie primaire après le pont de redressement (4). Un pont d'ondulation proprement dit (5), comporte des thyristors à ouverture contrôlée, des diodes de retour, ainsi qu'un système d'oscillation LC permettant d'obtenir une oscillation naturelle entretenue. Ce système d'ondulation peut être lui-même court-circuité pour déballaster l'énergie emmagasinée (6). La sortie monophasée 600 Hz (7) du système d'oscillation est relié à un transformateur-élévateur à compensation intégrée (8) permettant l'alimentation du générateur d'ozone proprement dit (9). Tous les paramètres caractéristiques de fonctionnement du convertisseur de fréquence sont contrôlés systématiquement, en continu et en temps réel, par un système informatique spécialement développé pour cet usage. Afin d'assurer une protection efficace du générateur d'ozone en cas de court circuit, le système de commande et contrôle agit, après détection instantanée sur les paramètres fréquence, tension et courant, de façon à limiter volontairement le courant alimentant le court-circuit et à permettre une fusion rapide et efficace du ou des fusibles individuels protégeant chacun des tubes diélectriques. Dans de telles conditions, le courant de court-circuit est maintenu à une valeur très inférieure à celle provoquant le percement d'un tube métallique. La fusion des fusibles est parfaitement contrôlée, et le système offre une sécurité maximale.

Les convertisseurs de fréquence sont construits suivant la technique monobloc et comportent en façade les appareils de

Figure 567. Installation de MAKIS (Yougoslavie) pour la ville de Belgrade. Alimentation électrique MF. Vue sur la BT, le pont onduleur et le compartiment HT.

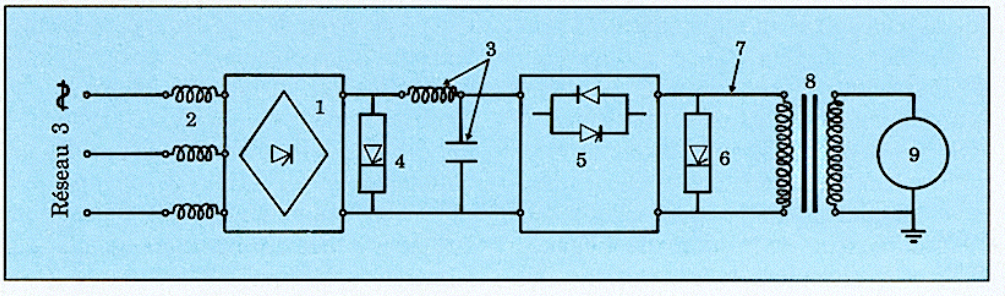


Figure 566. Schéma d'onduleur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

commande et de contrôle, ainsi que les dispositifs d'arrêt d'urgence. Le système est muni de dispositifs de ventilation autonomes, permettant le refroidissement par air pulsé de l'ensemble du matériel électrotechnique. La puissance délivrée par de tels convertisseurs de fréquence va de quelques dizaines de kilowatts à plusieurs mégawatts.

L'alimentation d'un générateur d'ozone en MF permet de soutirer, sur un réseau triphasé, de façon parfaitement équilibrée, et présente un facteur de puissance globale, vu du réseau, proche de l'unité par valeur arrière.

Dans le cas où la tension du réseau présente des fluctuations autour de la valeur de référence, le convertisseur de fréquence étant toujours calculé pour fournir sa pleine puissance de dimensionnement sous la tension minimale d'alimentation, il peut s'ensuivre de légères variations du facteur de puissance, dues aux taux d'ouverture des thyristors du pont redresseur, lorsque la tension présente une valeur élevée.

Pour une même production d'ozone, la moyenne fréquence permet de mettre en oeuvre des générateurs plus petits, un nombre de tubes de diélectriques moins important, et un encombrement général au sol moindre qu'une installation alimentée en courant 50 ou 60 Hz (réduction du génie civil).

5.4. LA GAMME DES OZONEURS DEGRÉMONT

Les ozoneurs DEGRÉMONT existent en différentes tailles standard.

Dans un ozoneur courte longueur, chaque tube métallique du faisceau tubulaire contient un tube diélectrique. Dans un ozoneur grande longueur (figure 562) deux tubes diélectriques sont logés dos à dos dans un tube métallique de longueur double. Dans l'un et l'autre cas, l'alimentation électrique se fait par l'une des faces comportant une borne d'alimentation haute tension. La seconde face, si c'est le cas, est alimentée par un transfert haute tension interne parfaitement protégé.

Les apppareils couvrent une gamme de production d'ozone allant de 0,017 $kg.h^{-1}$. à 20 $kg.h^{-1}$. pour une concentration de l'ozone dans l'air de 18 $g.Nm^{-3}$ et une alimentation à la fréquence industrielle de 50 Hz. Lorsque ces appareils sont alimentés en moyenne fréquence 600 Hz et en air, leur production est comprise alors entre 0,8 $kg.h^{-1}$ et environ 70 $kg.h^{-1}$, pour une concentration de 18 $g.Nm^{-3}$..

Lorsque ces mêmes appareils sont alimentés en oxygène et en moyenne fréquence, leur production est comprise entre 1,5 $kg.h^{-1}$ et 120 $kg.h^{-1}$, pour une concentration d'ozone de 70 $g.Nm^{-3}$.. Dans cette gamme, on peut distinguer les appareils monoblocs comportant de 14 à 170 tubes diélectriques, dont la production à partir d'air est comprise entre 0,2 $kg.h^{-1}$. et environ 3 $kg.h^{-1}$.

Les appareils monoblocs standard comportent, dans une même armoire (OZONAZUR M), ou sur un même châssis (OZONAZUR MB), la cellule de production

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

d'ozone, les appareils de conditionnement de l'air, les appareils électriques basse tension nécessaires à l'alimentation en puissance et aux dispositifs d'automatisme et de sécurité, ainsi que le transformateur élévateur de tension.

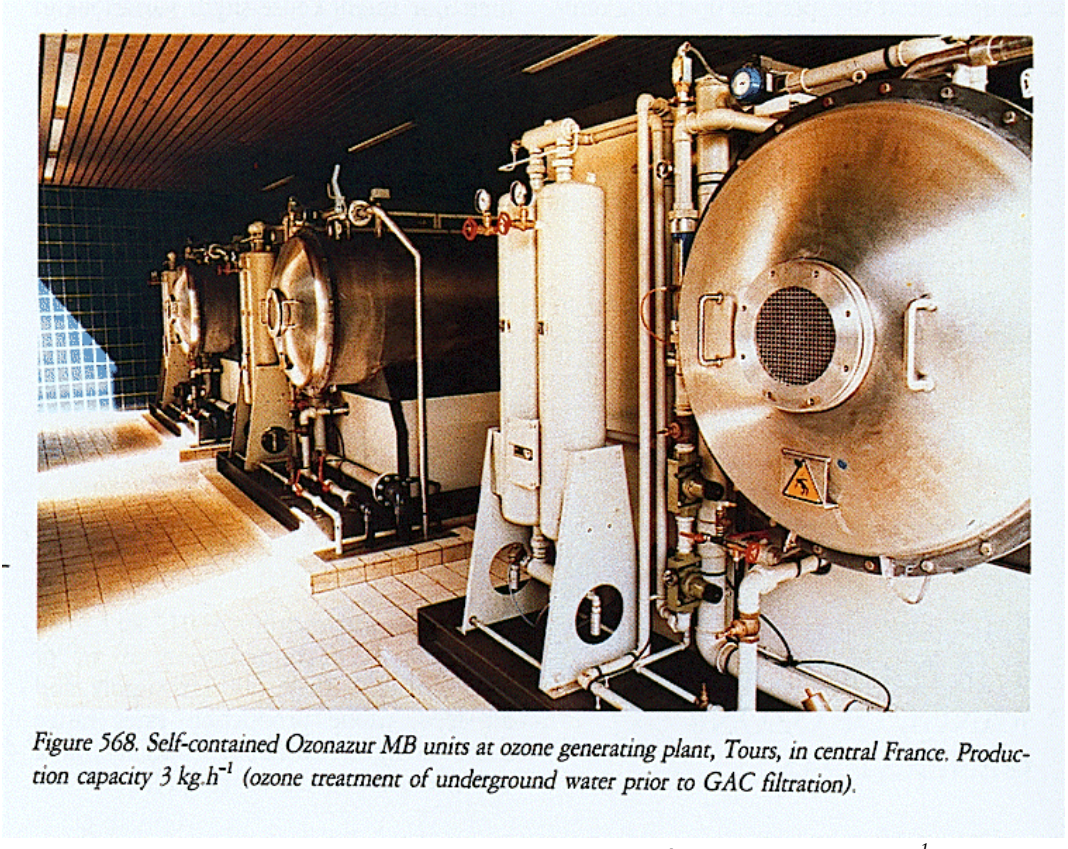


Figure 568. Self-contained Ozonazur MB units at ozone generating plant, Tours, in central France. Production capacity 3 kg.h^{-1} (ozone treatment of underground water prior to GAC filtration).

Figure 568. Installation de TOURS (Indre-et-Loire). Capacité de production: 3 kg.h^{-1}. Ozonation d'eau souterraine avant filtration sur CAG. OZONAZUR MB monobloc.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

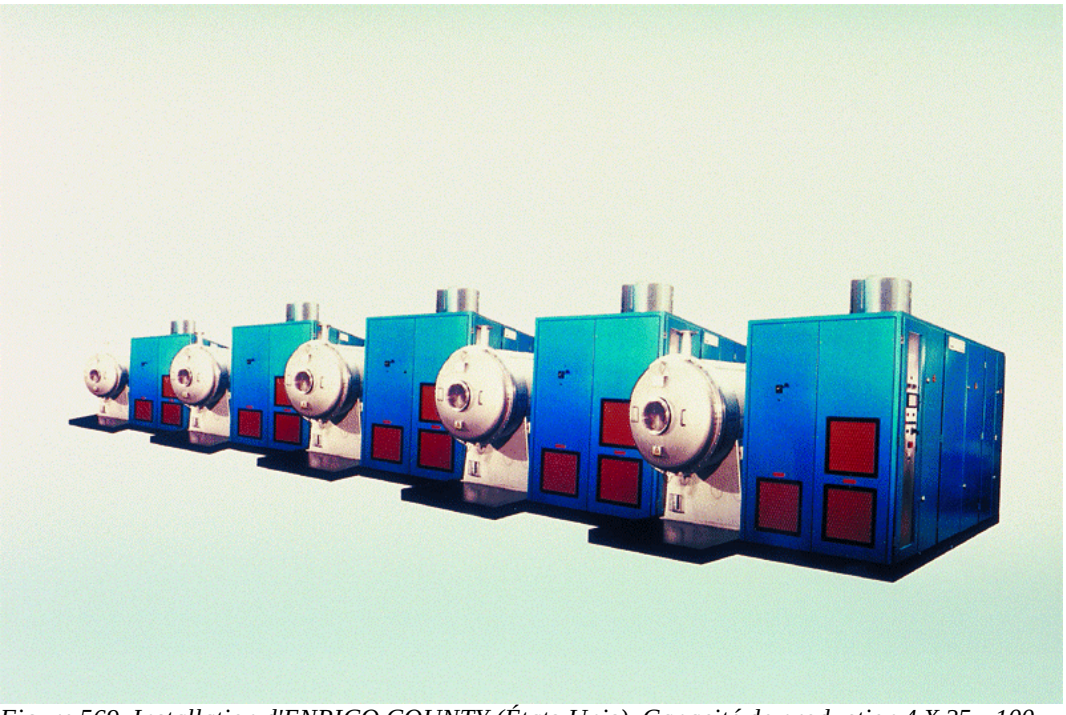


Figure 569. Installation d'ENRICO COUNTY (États-Unis). Capacité de production 4 X 25 =100 kg.h^{-1}. Désinfection des ERU. Batterie d'ozoneurs type MBF 202 à l'oxygène.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.5. ALIMENTATION EN GAZ VECTEUR

Les ozoneurs peuvent être alimentés à l'air ou à l'oxygène ou, éventuellement, par un mélange, en proportion variable, des deux gaz.

Le choix de l'un ou l'autre des gaz vecteurs dépend:

- de l'application envisagée,
- de la possibilité de disposer d'oxygène pur,
- de la taille de l'installation.

L'utilisation de l'oxygène conduit à une réduction notable de la taille des équipements et des coûts. Mais, bien que l'utilisation de l'oxygène présente de nombreux avantages, c'est encore l'air qui est le plus utilisé dans les installations de faible et moyenne capacité (figure 570).

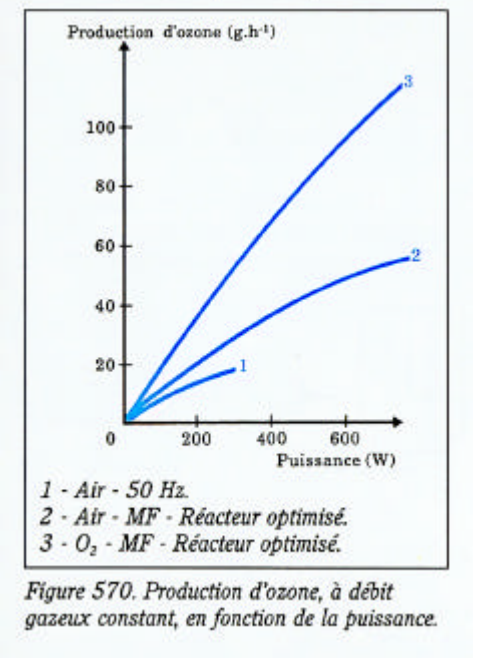


Figure 570. Production d'ozone, à débit gazeux constant, en fonction de la puissance.

5.5.1. Alimentation à l'air

L'air doit être soigneusement conditionné et séché, pour plusieurs raisons

- les poussières contenues dans l'air contribuent, par transport de charges électriques, à la formation éventuelle d'arcs, nuisibles à la production de l'ozone et consommateurs d'énergie. Les dépôts formés créent des perturbations électrostatiques réduisant la production d'ozone,
- la vapeur d'eau contenue dans l'air favorise également l'apparition d'arcs, par abaissement de la rigidité diélectrique du milieu gazeux. En outre, une partie de l'énergie électrique est consommée en pure perte pour ioniser la vapeur d'eau, ce qui entraîne une dégradation du rendement de production d'ozone,
- enfin, les oxydes d'azote produits par la décharge dans l'air, donnent naissance, en présence de vapeur d'eau, à des

dérivés nitrés qui encrassent inutilement

les appareils, nuisent à la production

d'ozone, et sont indésirables dans l'eau potable.

5.5.1.1. Compression de l'air

La pression d'alimentation d'une ligne de traitement d'air dépend du mode de traitement et de séchage de ce fluide.

Trois cas peuvent se présenter

. Le séchage de l'air HP, sans apport de

calories pour la régénération. La pression absolue d'alimentation de la ligne d'air est alors comprise entre 8 et 9 bars, Les machines utilisées pour assurer le débit d'air sous la pression requise peu

vent être - à pistons secs, - à vis lubrifiées, - à pistons rotatifs lubrifiés.

. le séchage de l'air HP, avec apport de calories pour la régénération (sécheurs

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 571. Installation de LOUVECIENNES (Yvelines). Capacité de production MF d'ozone: 2 X 6,25 kg.h^{-1}. Poste de compression d'air BP

mixtes). La pression absolue d'alimentation de la ligne d'air est comprise entre 8 et 9 bars et les machines sont de type similaire à celles ci-dessus,

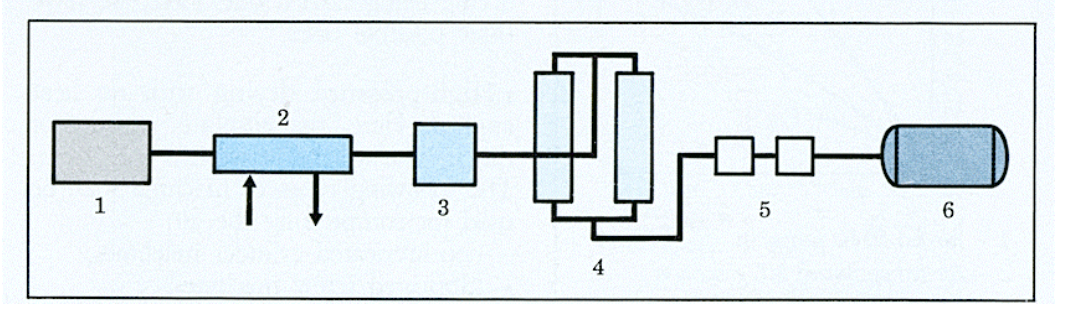
. le séchage de fuir BP, avec apport de calories pour la régénération. La pression absolue d'alimentation de la ligne d'air est comprise entre 2 et 2,2 bars et les machines utilisées pour assurer le débit d'air sous la pression requise, peuvent être

- à vis sèches,
- à vis lubrifiées,
- de type Roots amélioré pour les cas les moins difficiles.

5.5.1.2. Dessication de l'air

Cette dessication se fait habituellement en un stade sous HP ou en deux stades sous BP. a) -Dessication en un stade par sécheurs "sans chaleur" (figure 572)

L'air comprimé, préalablement refroidi



1 - Compresseur *3 - Filtration* *5 - Détendeur*
2 - Refroidissement *4 - Séchage* *6 - Ozoneur*

Figure 572. Schéma de dessication sans chaleur HP

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

dans un échangeur à circulation d'eau, est envoyé dans un sécheur contenant un matériau adsorbant tel que l'alumine activée. Cet appareil comporte deux capacités de séchage, dont l'une est en régénération pendant que l'autre assure le séchage de l'air (voir figure 573).

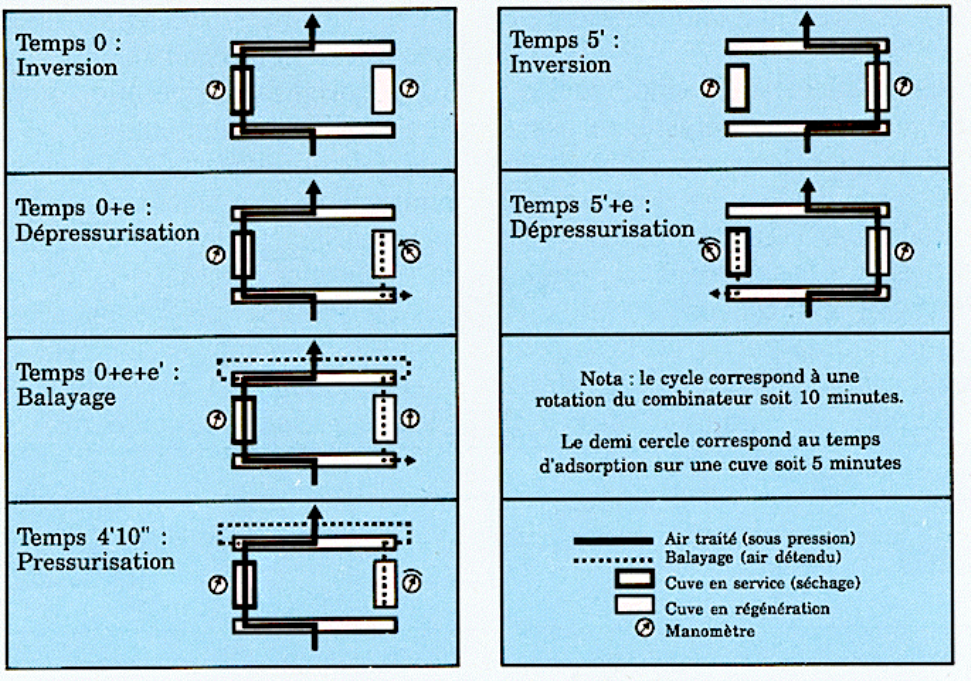
La régénération d'un sécheur "sans chaleur" ne nécessite pas d'apport extérieur de calories; l'adsorption étant un phénomène exothermique, on utilise les calories disponibles dans l'air sec, ainsi que le gradient de pression entre les deux phases, pour assurer la désorption de l'eau fixée dans la colonne en cours de régénération.

La quantité d'air sec consommée pour la régénération est comprise habituellement entre 20 et 25 % du débit total entrant dans le sécheur. Cette quantité varie avec la taille de l'appareil et la pression d'alimentation.

b - Dessication en un stade par "sécheurs mixtes"

Comme précédemment, l'air comprimé est préalablement refroidi dans un échangeur à circulation d'eau, puis introduit dans le sécheur proprement dit contenant de l'alumine activée, répartie dans deux capacités dont l'une est en fonctionnement pendant que l'autre est en régénération.

La régénération d'un sécheur mixte nécessite un apport extérieur de calories, qui est assuré par l'intermédiaire de résistances électriques noyées dans le lit d'alumine de chacune des colonnes, ainsi qu'un faible débit d'air sec délivré par la colonne en fonctionnement. Ainsi, le débit total d'air sec nécessaire pour la régénération de l'appareil se trouve diminué, cependant que la consommation électrique se trouve augmentée.



Sécheur type sans chaleur "SC". Fuite 20 à 25 %.

Figure 573. Schéma de fonctionnement d'un dessicateur sans chaleur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

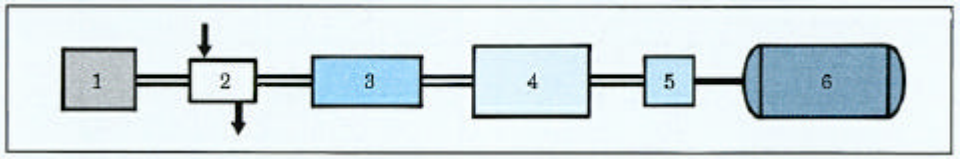
Figure 574. Installation du MONT-VALÉRIEN (Hauts-de-Seine) pour la C.E.B. Capacité de production: 2 X 6,5 =13 kg.h-1. Production MF d'ozone. Sécheurs sans chaleur HP.

c - Dessication en deux stades sous BP (figure 575)

Ce mode de séchage est employé dans les installations importantes. L'air passe d'abord dans un échangeur -refroidisseur primaire, refroidi à l'eau, et dont il sort à une température comprise entre 30 et 40 °C. L'air passe ensuite dans un appareil réfrigérant où est condensée (premier stade) une grande partie de la vapeur d'eau qu'il contient. Il sort du réfrigérant à une température comprise entre 3 et 5°C et se trouve au voisinage de la saturation à cette température.

L'appareil de réfrigération de l'air peut être, indifféremment, un groupe frigorifique à détente directe ou un condenseur, alimenté en eau glacée par le circuit de refroidissement de l'ozoneur, dans le cas où ce dernier en comp orte un.

L'air traverse ensuite un sécheur qui contient, comme précédemment, un matériau adsorbant tel que l'alumine activée (deuxième stade). Ce sécheur BP comporte



1 - Compresseur.
2 - Échangeur primaire
3 - Réfrigération.
4 - Séchage
5 - Filtration.
6 - Ozoneur.

Figure 575. Schéma d'une dessication d'air BP en deux stades.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

deux capacités de séchage (A et B) travaillant alternativement (figure 576). La régénération est assurée par un apport extérieur de calories véhiculées par de l'air chaud qui circule dans la colonne en régénération.

5.5.1.3. Filtration après séchage

Le chauffage de l'alumine, ainsi que la répétition des cycles, entraînent la formation de fines qu'il est indispensable d'éliminer par une filtration à 0,5 µm.

5.5.2. Alimentation à l'oxygène

Pour les installations petites et moyennes, l'alimentation en oxygène peut être faite soit à partir d'un stockage liquide muni d'un évaporateur, soit à partir d'un oxyduc, soit éventuellement à partir d'une petite unité autonome de production d'oxygène. Ces installations travaillent en oxygène perdu.

Pour les grosses installations (production supérieure à environ 5 0 $kg.h^{-1}$), l'ins-

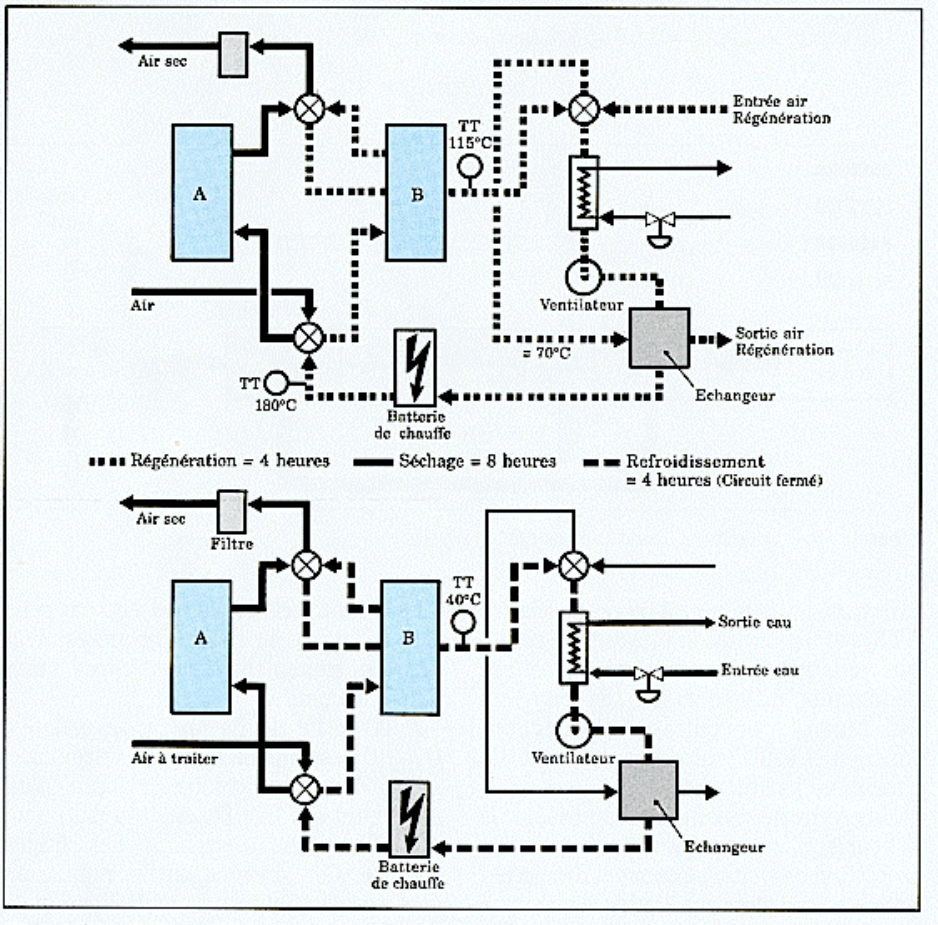


Figure 576. Sécheur BP à régénération par chaleur extérieure. Schéma de fonctionnement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

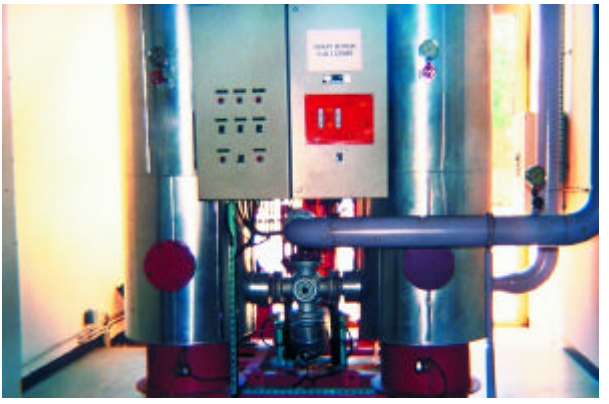


Figure 577 Installation de LOUVECIENNES (Yvelines). Capacité de production MF d'ozone: 2 X 6,25 =12,5 kg.h^{-1}. Dessicateur d'air BR

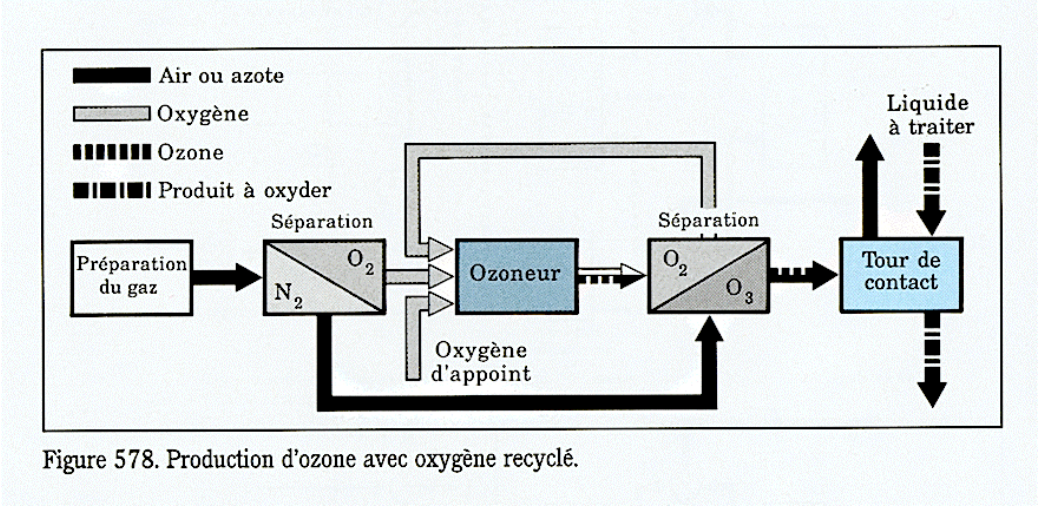


Figure 578. Production d'ozone avec oxygène recyclé.

tallation d'une boucle à oxygène (figure 5 78) est une solution élégante et rentable, puisque l'on profite de l'excellent rendement de génération en oxygène pur (énergie-concentration-production) tout en s'affranchissant du coût de l'oxygène perdu.

L'oxygène nécessaire au remplissage de la boucle, puis au remplacement continu de la fraction convertie en ozone et des pertes, provient d'un stockage liquide, d'une unité cryogénique ou d'un oxyduc.

Les caractéristiques de cet oxygène (pureté, point de rosée), ne nécessitent pas de traitement avant introduction dans l'ozoneur.

A la sortie de l'ozoneur, le mélange OZ + *03* est introduit, après refroidissement, dans une colonne remplie d'un adsorbant qui fixe l'ozone et restitue un flux d'oxygène contenant des traces d'ozone. Cet oxygène, après remise en pression, est introduit sur la ligne d'alimentation de l'ozoneur, avant introduc-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

fion de la fraction d'oxygène frais. Après un temps d'adsorption, la colonne est permutée et balayée à l'aide d'un gaz de désorption qui peut être, indifféremment, l'azote pur issu de l'unité cryogénique ou de l'air sec traité dans les autres cas. A la sortie de la colonne en désorption, on obtient un flux d'azote ou d'air contenant l'ozone à une concentration sensiblement la même que celle à laquelle il a été introduit

Le nombre de colonnes, ainsi que le chevauchement de cycles, conditionnent la stabilité du débit d'ozone. Par action sur le débit de désorption et la puissance de l'ozoneur, il est possible de faire varier le débit massique et la concentration de l'ozone dans le gaz vecteur.

Ce système de production d'ozone à boucle d'oxygène est particulièrement intéressant pour des procédés industriels fort consommateurs d'ozone.

5.6. DESTRUCTION DE L'OZONE

Après mise en contact avec l'eau à traiter, l'air qui s'échappe du réacteur contient une certaine quantité d'ozone résiduel. Suivant le type de réacteur utilisé et le taux d'ozone résiduel que l'on souhaite maintenir dans l'eau traitée, la perte en ozone peut atteindre 1 à 15% de l'ozone produit. Il importe d'éviter le rejet à l'extérieur d'air trop riche en ozone (figure 579).

Le recyclage de l'ozone résiduel en tête du système de mise en contact peut être envisagé. Il faut cependant savoir que ce système entraîne une dépense notable d'énergie (nouvelle mise sous pression de l'air contenant l'ozone résiduel ou énergie dépensée par une turbine de recirculation) et ce, pour un résultat peu important, spécialement dans le cas des EP. En effet, la concentation en ozone résiduel de l'air est faible (0,2 à 2 $g.Nm^{-3}$ et le rendement de dissolution de l'ozone à cette concentration est très bas (< 50 %).

Cette recirculation ne dispense donc pas de la destruction de l'ozone qui sub**siste** et dont la concentration finale dans l'air ne doit pas dépasser 0,1 ppm en volume.

La dilution pure et simple dans l'atmosphère étant à proscrire, on procède généralement à une destruction systématique de l'ozone en excès. Il existe en théorie trois méthodes principales, pour détruire l'ozone résiduel.

La méthode chimique peut se concevoir pour de petites installations de type laboratoire, mais non pour les moyennes ou grosses installations, la consommation en réactif étant rédhibitoire.

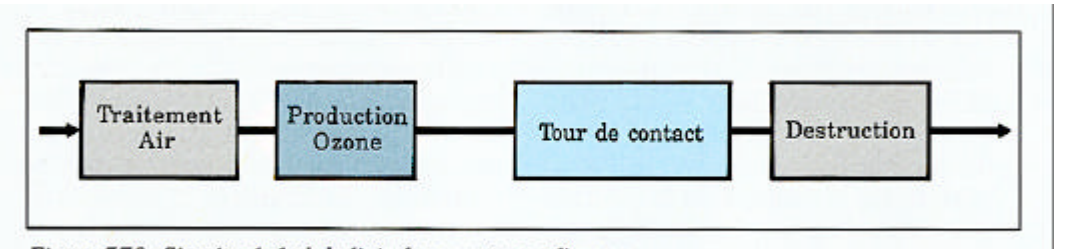
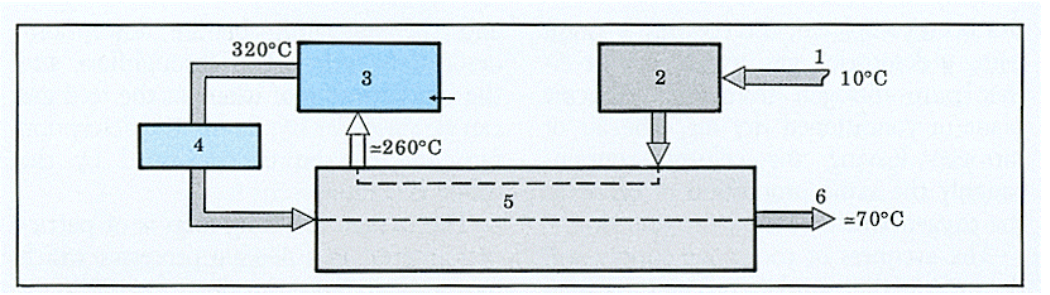


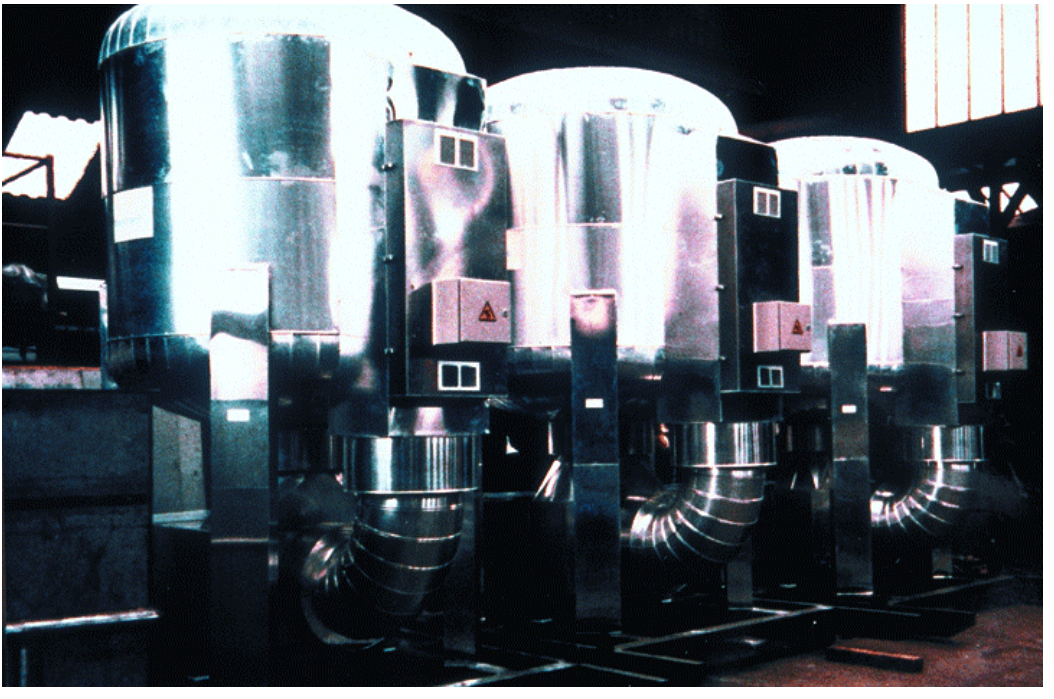
Figure 579. Circuit général de l'air dans un poste d'ozone.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Entrée d'air contenant 0_3 à détruire.
2 - Ventilateur.
3 - Réchauffeur purifié
4 - Réacteur.
5 - Échangeur air/air.
6 - Sortie d'air

Figure 580. Destruction thermique avec récupération d'énergie.



La **méthode catalytique** a été employée, mais les catalyseurs mis en oeuvre ne sont pas spécifiques de cette opération et sont très sensibles aux poisons, tels que oxydes d'azote, chlorures, sulfures. Leur courte durée de vie nécessite, par ailleurs, un changement fréquent de la charge.

La **méthode thermique** est la méthode la plus fiable. Elle peut se mettre en service avec ou sans récupération d'énergie.

- Pour les petites installations dont le débit d'air ozoné à traiter est inférieur à 200 Nm3.h-1, la destruction thermique se fait sans récupération d'énergie, en élevant la température du gaz à 320 °C environ. Le chauffage de l'air à traiter s'effectue à l'aide de résistances spéciales, en métal déployé, qui ne nécessitent pas de contraintes particulières d'installation. L'alimentation électrique s'effectue à l'aide d'un bloc de thyristors dont la puis

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sance est régulée à partir de la température.

- Pour les moyennes ou grosses installations, dont le débit d'air ozoné à traiter est supérieur à 200 $Nm^3.h^{-1}$, la destruction thermique avec récupération d'énergie permet, après mise en régime, de récupérer sur les gaz chauds sortant du four de destruction, 80 % de l'énergie calorifique qu'ils contiennent

Dans ces conditions, l'appoint en énergie électrique représente 20 à 25 % de l'énergie totale nécessaire pour atteindre la température (320 °C) ; la figure 580 donne le schéma d'une telle installation.

L'air contenant le résiduel d'ozone (1) est aspiré à l'aide d'un ventilateur (2), dans le ciel du réacteur de mise en contact et refoulé dans le circuit secondaire d'un échangeur thermique à haut rendement de type "platulaire" (5) où sa température s'élève de 15 à 260 °C en régime établi. A la sortie de cet échangeur, l'air ainsi réchauffé est introduit dans le four proprement dit (3) où sa température est portée à 320 °C environ. Après son passage dans une capacité réactionnelle (4) assurant un temps de séjour d'environ 3 secondes, l'air transite dans le circuit primaire de l'échangeur où il cède à contre-courant l'énergie calorifique qu'il contient A la sortie de l'échangeur, la température de l'air est d'environ 70 °C. Ce dernier est évacué à l'atmosphère (6).

Figure 581 bis. Installation de BEDOK (Singapour). Capacité de production: 4 x 12,4 = 49,6 $kg.h^{-1}$. Poste de production d'ozone (air-BF).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. AUTRES PROCÉDÉS D'OXYDATION

6.1. PERMANGANATE DE POTASSIUM

Ce réactif (voir page 519), relativement coûteux, est surtout utilisé en prétraitement pour l'élimination du manganèse en solution dans l'eau. Son action est plus efficace que celle du chlore. Il oxyde également le fer si celui-ci est présent.

Le permanganate a été utilisé, dans quelques cas, en préoxydation d'eau de surface pour l'élimination des MO; mais les difficultés d'adaptation de la dose conduisent à un risque de présence de manganèse soluble (eau rose en cas d'excès de $KMnO_4$).

6.2. BROME

Le brome a des propriétés antiseptiques et algicides qui conduisent à l'utiliser pour la désinfection des eaux de piscine. La dose minimale résiduelle à observer est de 1 $g.m^{-3}$.

6.3. PÉROXYDE D'HYDROGÈNE (ou eau oxygénée)

Les solutions commerciales ont une concentration de 35 %, 50 % ou 70 % en poids de H_2O_2 (voir page 519).

La stabilité de ce réactif peut être améliorée par l'adjonction de certains additifs. Sa décomposition est accélérée par certains métaux, la température, la lumière ou un pH basique. Pour éviter cette décomposition, le récipient de stockage et le matériel de dosage doivent être réalisés en acier inoxydable.

6.4. ACIDE MONOPERSULFURIQUE (ou acide de Caro)

Ce réactif (voir page 521), de formule chimique H_2SO_5, est employé pour oxyder les cyanures avant rejet (voir page 258). Il est livré sous forme de solution commerciale à 200 $g.l^{-1}$ en H_2SO_5 (15 % en poids). Cette solution est stable quelques mois et craint la chaleur.

Le réactif commercial H_2SO_5 est dosé directement dans le réacteur d'oxydation des cyanures. L'ajustement du pH dans le réacteur est effectué à la soude.

Il est également possible de préparer le réactif sur place, à partir d'eau oxygénée et d'acide sulfurique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.5. CHLORAMINES

Elles sont utilisées en désinfection; leur action bactéricide est plus lente que celle du chlore, mais avec effet rémanent important du fait de leur stabilité. Leur utilisation ne conduit pas à la formation d'haloformes.

Elles sont, en général, préparées en employant du chlore et de l'ammoniac (dose d'ammoniac comprise entre 1/4 et 1/2 de la dose de chlore) ou des sels ammoniacaux. En cas d'utilisation en EP, il n'est pas recommandé de compter sur l'ammonium initialement présent dans l'eau brute.

Ces composés peuvent présenter un intérêt dans certains cas tels que

- longs réseaux avec temps de séjour et températures élevés,
- canalisations avec revêtements donnant des mauvais goûts en cas d'utilisation du chlore.

6.6. RAYONS ULTRAVIOLETS

Les rayons ultraviolets, de longueur d'onde comprise entre 200 et 300 nm, UV-C (figure 582), présentent une action germicide puissante, dont le maximum se situe aux environs de 260 nm. Leur utilisation en traitement d'eau permet la destruction des bactéries et virus sans addition de produits chimiques.

En pratique, ces rayons sont produits par des lampes à vapeur de mercure. Deux types de lampes existent: lampes basse pression ou haute pression. Ces dernières émettent des puissances UV-C plus élevées (environ100 à 150 W UV-C mais avec des rendements énergétiques inférieurs (la consommation est d'environ 15 W par W UV-C pour une lampe HP au lieu de 8 W par W UV-C pour une lampe BP). Les durées de vie de ces lampes sont d'environ 8 000 h pour le type BP et 3 000 h pour le typeHP.

Un appareil de traitement UV se compose d'une ou plusieurs lampes placées dans des gaines de quartz pour être isolées thermiquement de l'eau. Certains appareils industriels sont équipés de systèmes de contrôle de fonctionnement des lampes, couplés à des dispositifs de sécurité.

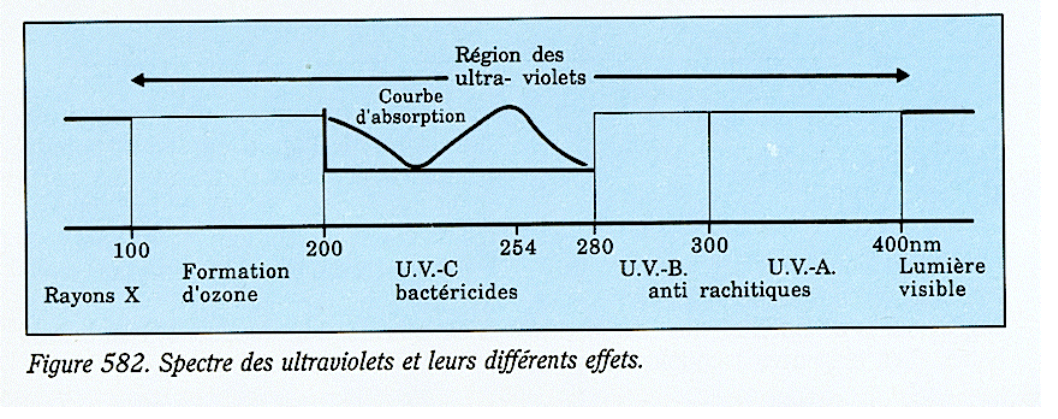


Figure 582. Spectre des ultraviolets et leurs différents effets.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les lampes peuvent être assemblées dans un tube cylindrique (appareil de type fermé -figure 583) ou dans un canal (appareil de type ouvert). Dans les deux cas, l'eau à traiter circule, au voisinage des lampes, en couche mince car les rayons sont rapidement absorbés par l'eau.

L'énergie consommée pour la désinfection varie en fonction de l'absorption du rayonnement par l'eau à traiter (turbidité,

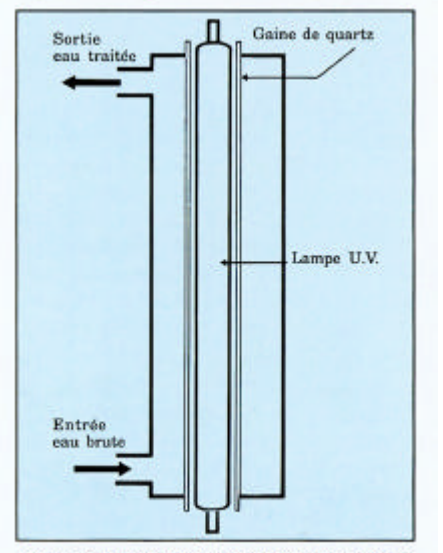
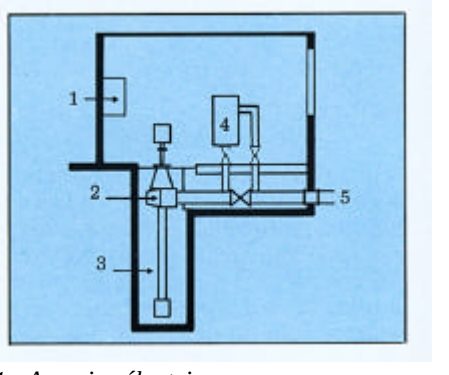


Figure 583. Principe du réacteur UV de type fermé.

présence de métaux, MO, ...) ; cette énergie se situe généralement entre 15 et 40 Wh.m-3. Cette absorption est caractérisée parla transmission (parfois appelée transmittance) de la couche liquide, et définie par le rapport des intensités lumineuses incidente et émergente.

Les domaines préférentiels d'application des UV sont la production d'eau ultra- pure et l'aquaculture. Ce procédé présente l'avantage de ne pas introduire d'éléments étrangers dans l'eau à traiter; par contre, il n'a pas d'effet rémanent Son application en traitement d'EP est donc limitée aux réseaux courts et bien entretenus.



1 - Armoire électrique
2 -Pompe.
3 - Puits.
4 - Réacteur UV.
5 - Vers distribution.
Figure 584. Poste de désinfection par UV pour EP

6.7. RAYONNEMENTS IONISANTS

Cette technique est utilisée pour la conservation de certains aliments. Elle a été envisagée pour la désinfection des eaux et des boues. Les exigences technologiques de mise en œuvre rendent encore aujourd'hui ce procédé

traitement des eaux. On utilise principalement des sources en cobalt. Les intensités de rayonnement annoncées sont:

- en désinfection: 450 kilorad avec 10^5 Ci/m^3.h,
- en stérilisation totale: 4,5 megarad avec 10^6 Ci/m^3.h.

Document adapté pour http://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7. ÉLIMINATION DES OXYDANTS RÉSIDUELS

Le résiduel d'oxydant doit, dans certains cas, être réduit ou éliminé:

- préparation d'eau de boisson,
- avant passage sur membrane ou sur résine échangeuse d'ions,
- après transport d'eau potable sur longue distance,
- avant rejet d'eau usée désinfectée dans un milieu naturel fragile,
- traces d'oxygène dans les eaux d'alimentation de chaudière, etc.

L'élimination peut être réalisée par voie chimique ou par voie physique.

7.1. ÉLIMINATION PAR VOIE CHIMIQUE

Le réactif chimique doit être du type réducteur (voir page 260). Il est généralement à base de dioxyde de soufre (voir page 521). Les différentes formes utilisées sont:

. dioxyde de soufre (SO_2) sous forme de gaz liquéfié. Il est livré dans des conteneurs sous pression. Le dosage est réalisé avec des équipements analogues à ceux utilisés pour le chlore gazeux. Le gaz est hydrolysé en acide sulfureux

$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2S0_3$.

La réaction s'écrit avec le chlore libre $H_2SO_3 + HClO \rightarrow HCl + H_2SO_4$

avec la monochloramine

$H_2SO_3 + NH_2Cl + H_2O \rightarrow NH_4Cl + H_2SO_4$ et de façon analogue avec la di- et la tri-chloramine.

La stoechiométrie avec le chlore est de 0,90 g de SO_2 par g de chlore (ou 1,46 g de $NaHSO_3$ par g de chlore).

. métabisulfite de sodium ($Na_2S_2O_5$) cristallisé à 60-62 % en $S0_2$.

. sulfite de sodium (Na_2SO_3) cristallisé,

. bisulfite de sodium ($NaHSO_3$), **livré en solution** aqueuse à 23-24 % en SO_2. La cinétique de réaction est considérée comme rapide.

En distribution d'eau potable on utilise habituellement le temps de contact disponible en canalisation, sans mettre en place de zone de réaction spécifique. Le dosage est régulé par asservissement au résiduel de chlore.

Devant osmose inverse, on utilise couramment un léger excès (environ 20 %) par rapport à la stoechiométrie.

Le bisulfite d'ammonium est parfois utilisé devant osmose inverse.

REMARQUE: Devant osmose inverse, le thiosulfate de sodium ($Na_2S_2O_3$) **ne doit pas** être utilisé, car il présente un risque de formation de soufre minéral (conduisant au colmatage des modules) par une réaction secondaire de décomposition du thiosulfate (dismutation).

Dans le cas des eaux de chaudière, le chapitre 25 décrit les conditions des traitements physique et chimique (nature des réactifs) utilisés.

Dans les IA.A, on utilise généralement du sulfite pur anhydre (ou exceptionnellement de l'acide ascorbique).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7.2. ÉLIMINATION PAR VOIE PHYSIQUE. LE CHARBON ACTIF DÉCHLOREUR

Le charbon actif agit par effet catalytique. Les temps de contact dans les colonnes sont de l'ordre de quelques minutes.

L'efficacité "déchlorante" du charbon actif diminue avec le temps, par suite de l'empoisonnement (matières organiques, produits d'oxydation, ...) des sites de catalyse. Cette technique est utilisée principalement dans l'industrie de préparation des boissons. Elle est à déconseiller avant osmose inverse: risque de prolifération bactérienne, relargage de fines.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

18
ÉPAISSISSEMENT ET STABILISATION DES BOUES

Toutes les boues nécessitent une forme de traitement ou une autre, avant d'être rejetées dans le milieu naturel ou d'être éventuellement réutilisées. La classification des boues, leur nature, la quantité produite et leur destination finale sont données au sous-chapitre 6 du chapitré 2. La figure 585 donne les principales étapes possibles d'un traitement de boues.

Le traitement des boues doit répondre à au moins l'un des deux objectifs suivants

- réduction du volume,
- réduction du pouvoir fermentescible.

La **réduction du volume** peut être obtenue

- soit par un **épaississement**, après lequel la boue demeure fluide,
- soit par déshydratation (drainage et séchage naturels, séparation mécanique), - soit après **déshydratation**, par **séchage thermique ou incinération.**

La déshydratation nécessite le plus souvent un conditionnement préalable de la boue; un **conditionnement** peut être parfois bénéfique avant épaississement.

La réduction du pouvoir fermentescible (ou stabilisation) peut être obtenue par

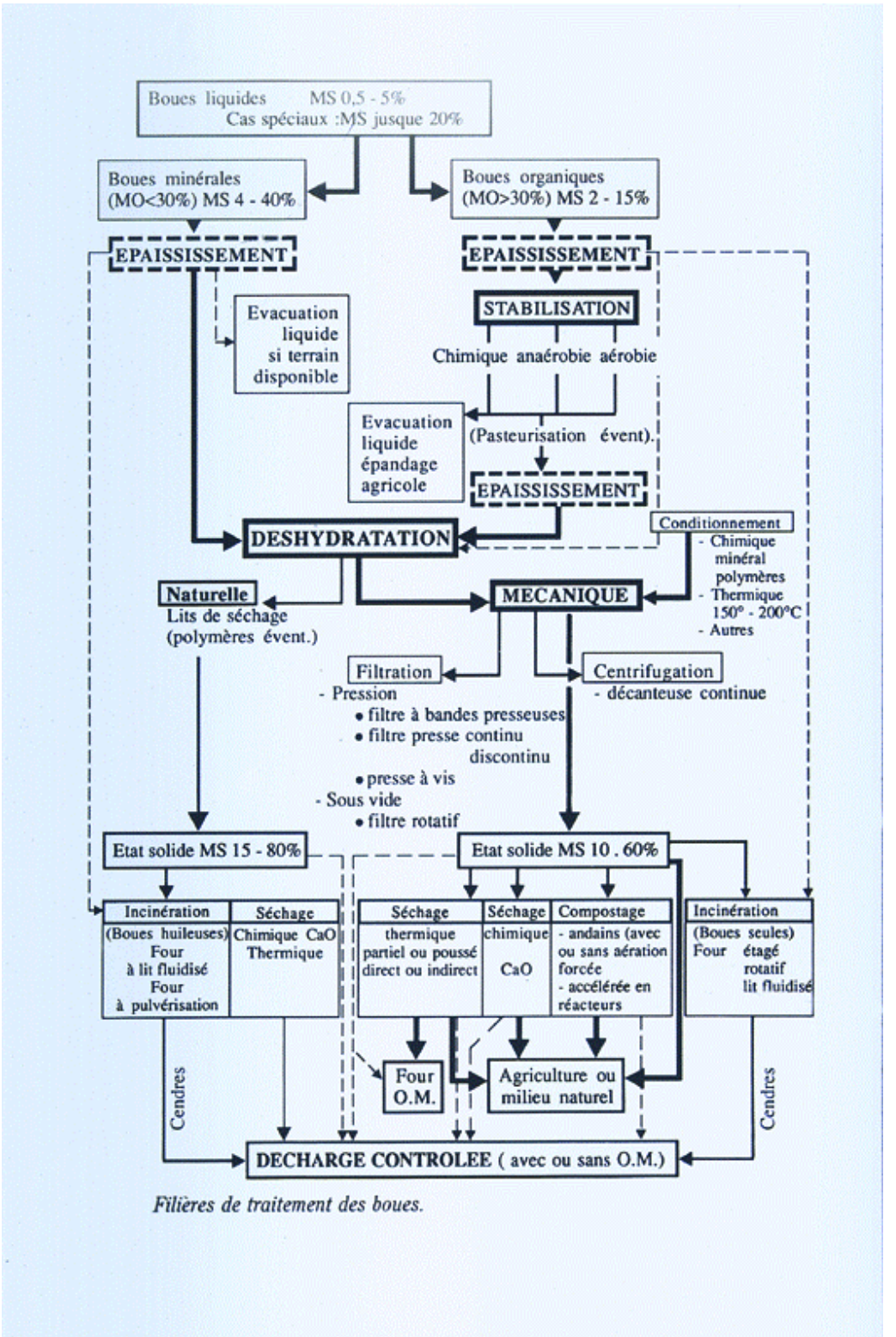
- digestion anaérobie,
- stabilisation aérobie,
- stabilisation chimique,
- séchage et incinération en stade ultime.

D'autre part, une élimination poussée des germes pathogènes peut être recherchée; la pasteurisation, ainsi d'ailleurs que le conditionnement par cuisson, répondent à cet objectif. L'oxydation chimique directe en milieu aqueux sous très forte pression permet, à la fois, stabilisation et pasteurisation.

Il est presque toujours préférable, lorsqu'un épaississement et une stabilisation sont prévus, de les réaliser dans cet ordre et non à l'inverse, tout au moins quand le procédé de stabilisation est de nature biologique. L'épaississement des boues digérées anaérobies est très lent, en particulier du fait de l'occlusion de grandes quantités de microbulles de gaz. Quant à celui des boues stabilisées aérobies, il est très souvent médiocre. Sont donc considérées successivement les techniques d'épaississement et stabilisation, puis, au chapitre 19, celles de conditionnement, déshydratation, séchage et incinération

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



Filières de traitement des boues.

Figure 585. Filières de traitement des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. ÉPAISSISSEMENT DES BOUES

C'est le premier stade de réduction du volume des boues à traiter. Le dimensionnement et le coût d'exploitation de la chaîne de traitement des boues en sont directement dépendants. Le plus souvent, on appelle épaississement l'augmentation de concentration des boues collectées dans les décanteurs de clarification, tout en évitant d'atteindre une valeur éventuellement incompatible avec le pompage de ces boues. Cette concentration maximale varie beaucoup suivant le type de boues. Elle est beaucoup plus élevée sur des suspensions de particules grenues que sur des suspensions colloïdales, et la simple concentration en matières sèches d'une boue est loin de permettre une estimation de son état; il est essentiel, pour cela, de connaître la nature des constituants.

Les avantages d'un stade d'épaississement sont multiples

- à capacité égale d'ouvrage, augmentation du temps de séjour et du taux de dégradation des MO obtenus dans les digesteurs anaérobies (et aussi dans les stabilisateurs aérobies). L'épaississement des boues fraîches peut permettre de supprimer les "retours" de surnageants en provenance de ces ouvrages,
- augmentation de la fiabilité de l'ensemble de la chaîne de traitement d'eau. Les boues peuvent être extraites très liquides des décanteurs, et la qualité de l'eau décantée n'est pas détériorée, car le niveau de boues dans ces appareils peut être maintenu suffisamment bas. Le soin à apporter à l'extraction des boues est reporté sur un seul, ou sur un nombre très restreint d'appareils,
- réduction de l'importance des ouvrages de conditionnement (en particulier, dans le cas de conditionnement thermique),
- amélioration de la production des dispositifs de déshydratation: lits de séchage, centrifugeuses, filtres à bandes et surtout filtres-presses.

L'inconvénient de l'épaississement, en dehors d'un investissement supplémentaire souvent compensé par ailleurs, est d'être la source d'éventuelles nuisances dans le cas de boues organiques. La première mesure de prévention est d'assurer une exploitation suivie et rationnelle des appareils. La couverture des ouvrages et la désodorisation de l'air vicié des enceintes permettent la protection de l'environnement. Le chaulage des boues permet aussi un contrôle du phénomène.

Deux techniques principales d'épaississement sont utilisées

- l'épaississement par décantation,
- l'épaississement par flottation,

auxquelles il faut ajouter

- l'épaississement par centrifugation,
- l'épaississement par drainage.

Certaines de ces techniques ont des domaines d'emploi limités et ne sont intéressantes que sur certaines boues. De ce fait, la combinaison de plusieurs types d'épaississement, sur une même station, est de plus en plus fréquente. Tel est le cas, en particulier, des stations d'épuration d'eaux résiduaires (urbaines ou industrielles), comportant décantation primaire et traitement biologique secondaire. L'épaississement séparé des boues activées en excès par une technique bien appropriée aux boues colloïdales, comme

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

la flottation, permet d'atteindre un volume total de boues épaissies (primaires + secondaires) sensiblement inférieur à celui obtenu par l'épaississement groupé du mélange de ces boues (qu'il soit recueilli dans un épaississeur proprement dit ou dans le fond d'un décanteur primaire recevant aussi les boues en excès).

Selon la technique d'épaississement utilisée et le type de boue, il est fait appel ou non à une floculation préliminaire au moyen de polymères organiques.

Un prétraitement des boues est souvent nécessaire avant épaississement. Suivant la qualité du prétraitement de l'eau brute et les techniques d'épaississement mises en oeuvre, ce prétraitement est plus ou moins complet. Il peut avoir pour but l'élimination de corps volumineux, de matières abrasives, de fibres, de graisses afin de prévenir les phénomènes d'usure et d'obstruction.

1.1. ÉPAISSISSEMENT PAR DÉCANTATION

(souvent seulement appelé "épaississement")

La suspension boueuse est introduite dans une cuve (épaississeur) où le temps de séjour est élevé, de façon à provoquer le tassement des boues dont l'évacuation se fait par le fond tandis que le liquide surnageant est évacué par le haut.

1.1.1. Bases de dimensionnement

La courbe de sédimentation de la boue, établie en utilisant un récipient de diamètre suffisant, est un bon guide. La théorie de KYNCH permet le calcul des épaississeurs et, en particulier, la détermination de la surface correspondant à la concentration de soutirage Cs (voir page 164 pour la détermination du flux massique limite F_L).

Il est plus difficile de fixer la hauteur de l'épaississeur, qui doit être la somme de la hauteur de compression nécessaire pour atteindre la concentration souhaitée et d'une hauteur de "revanche". Celle-ci doit permettre à la fois

- une clarification du liquide interstitiel,
- des variations du niveau de boue, liées à celles des conditions d'extraction,
- une bonne répartition hydraulique de la liqueur entrante.

Sa valeur est généralement comprise entre 1 m et 2 m. On a intérêt à construire des épaississeurs suffisamment hauts; une hauteur cylindrique totale, prenant en compte le volume de stockage, au moins égale à 3,5 m, est recommandée pour des boues d'ERU par exemple.

L'épaississement par décantation est le plus souvent mis en oeuvre sans conditionnement préalable (en dehors du cas de conditionnement thermique de boues organiques). L'apport de chaux est parfois appliqué sur des boues fermentescibles (p. 944) afin d'éviter les dégagements gazeux qui perturbent la décantation et provoquent de mauvaises odeurs. Sur ces mêmes boues, il y a lieu de limiter les temps de séjour (un jour en général).

A défaut de données expérimentales précises sur les courbes de sédimentation des suspensions considérées, on peut, en première approximation, utiliser le cadre de dimensionnement suivant

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. Épaississement des boues

Type de boues	**Flux massi ue** MS en $kg.m^{-2}.j^{-1}$	**Concentration possible** en MS $g.l^{-1}$
Boues primaires fraîches d'ERU	80 à 120 (suivant teneur en MO)	90 à 120 (70 à 80 avec prédégrillage fin)
Boues primaires + boues activées fraîches d'ERU*	45 à 70	40 à 60
Boues activées seules	25 à 30	20 à 30
Boues de décarbonatation - Forte proportion d'hydroxydes - Faible proportion d'hydroxydes	 350-450 800 à 1200	 150-200 600-800
Boues de floculation EP avec hydroxydes métalliques (sans limons)	15 à 25	15 à 30

* Très forte influence du rapport boues primaires/boues activées.

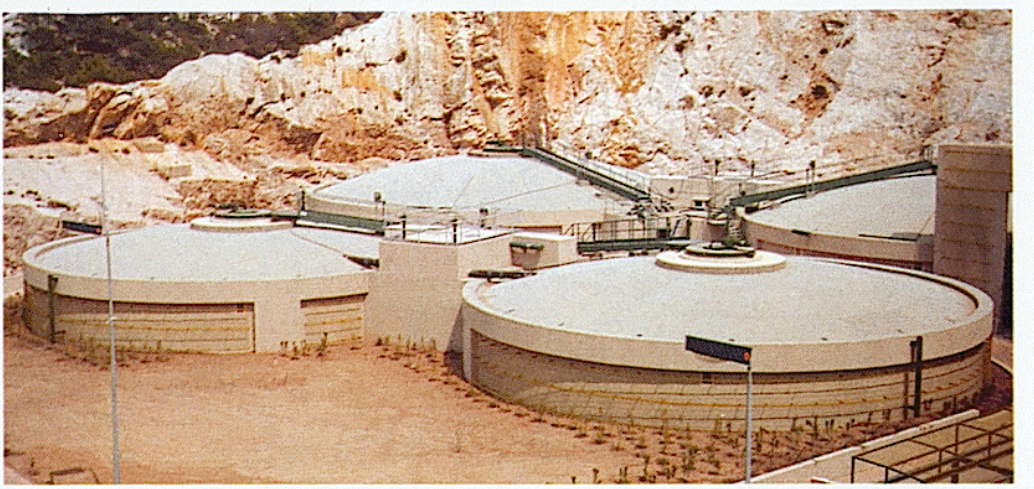
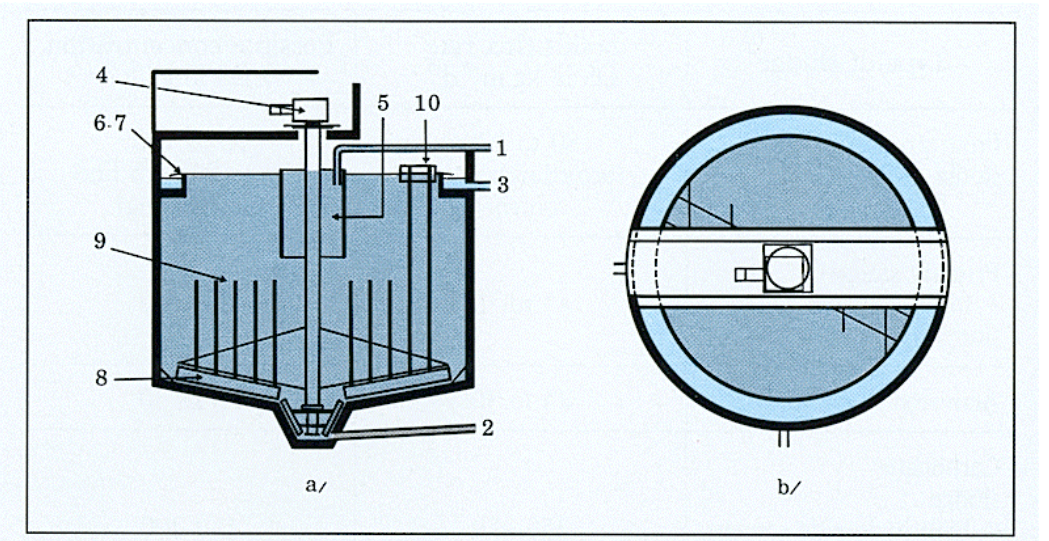


Figure 586. Installation de MARSEILLE (Bouches-du-Rhône). Capacité : 1 150 000 éq. habitants. Épaississement séparé : boues physico-chimiques (2 × 28 m Ø) et boues fraîches (2 × 20,50 m Ø).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Alimentation de l'épaississeur.
2 - Extraction des boues.
3 - Sortie surnageant.
4 - Tête d'entraînement
5 - Jupe de répartition.
6 - Déversoirs.
7 - Goulotte pour surnageant.
8 - Racleur de fond.
9 - Herses d'épaississement.
10 -Herse croûte.

Figure 587. Schéma simplifié d'épaississeur - a) vue en coupe.- b) vue en plan.

Figure 588. Installation de VALENTON (Val-de-Marne) pour le S.I.A.P.P. Capacité: 300 000 $m^3 j^{-1}$. Épaississeur à entraînement central Ø 52.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La vitesse ascensionnelle correspondant au débit de surverse n'est un paramètre essentiel de dimensionnement que pour les boues très diluées (MES < 3 $g.l^{-1}$ environ). Elle est de l'ordre de 0,5 $m.h^{-1}$ pour un mélange de boues primaires et de boues activées fraîches, si la hauteur de l'appareil est suffisante.

1.1.2. Épaississeurs mécanisés

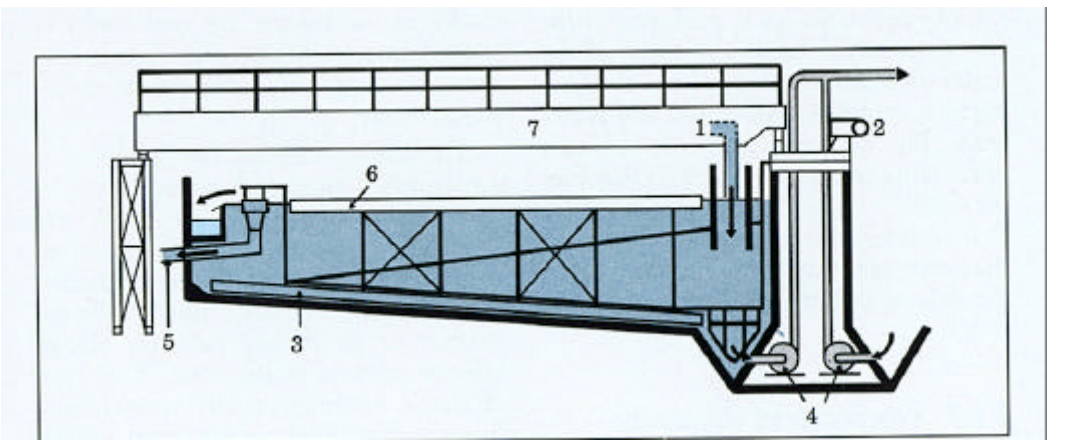
Les épaississeurs sont toujours de forme circulaire. La cuve cylindrique est exécutée en acier pour les petits diamètres. Elle est équipée d'un ensemble mécanique tournant dont le rôle est double

- assurer le transfert des boues déposées vers la fosse centrale, au moyen de racleurs disposés immédiatement au-dessus du radier,
- faciliter le dégagement de l'eau interstitielle et des gaz occlus au moyen d'une herse verticale accrochée au dispositif tournant.

La pente du radier des ouvrages en béton est comprise entre 10 et 20 %. L'ensemble du dispositif mécanique est normalement à entraînement central avec double bras diamétral. Celui-ci est de construction très robuste. Pour des appareils de grand diamètre et des boues lourdes, les couples nécessaires peuvent être élevés (par exemple, sur des boues d'in**dustries minéralières,** le couple d'entraînement peut dépasser 80 $m.daN/m^2$). Sur les boues d'ERU, les dispositifs d'entraînement sont généralement prévus pour des couples de l'ordre de 20 à 30 $m.daN/m^2$).

L'ensemble tournant est suspendu à une passerelle réalisée le plus souvent en béton (figure 587). Le système de raclage est constitué d'une série de raclettes montées "en jalousie".

Pour de très grands ouvrages, l'ensemble tournant peut être suspendu à un fût central qui sert également de guide. Il est alors intéressant, dans le cas de boues très compactes, d'installer les pompes d'extraction à l'intérieur même du fût central et d'ainsi pratiquement supprimer les tuyauteries d'aspiration des pompes à boues (figure 589).



1 - Alimentation...
2 - Tête d'entraînement. CENTRIDEG.
3 - Bras racleur de fond
4 - Pompes de reprise des boues
5 - Reprise des écumes
6 - Bras racleur d'écumes
7 - Passerelle d'accès (fixe)

Figure 589. Décanteur épaississeur avec pompage de boues dans le fût central.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

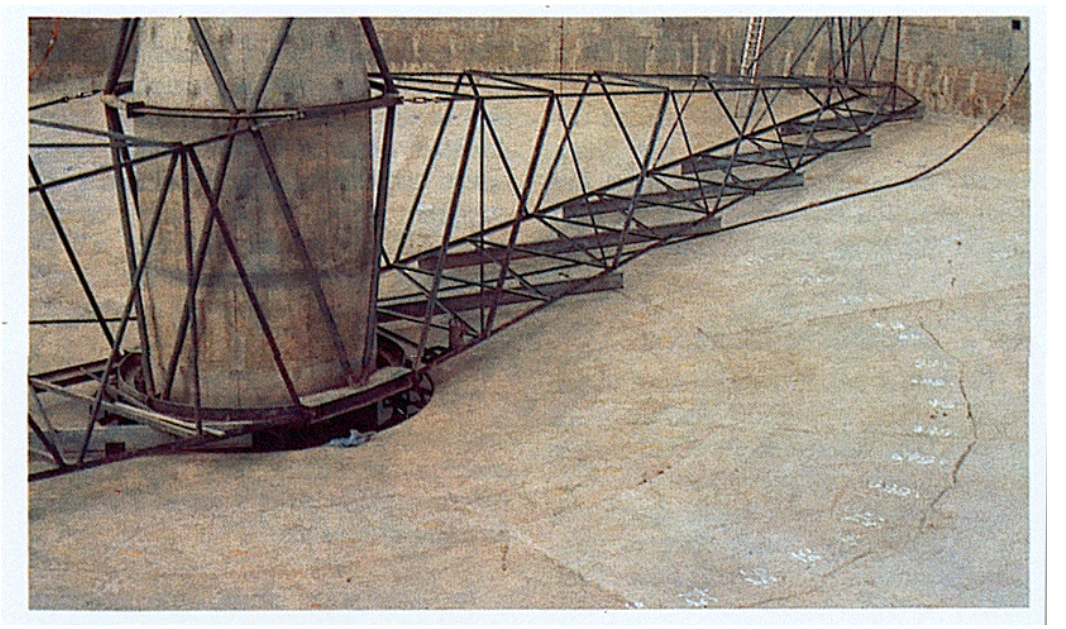


Figure 590. Installation de VALENTON (Val-de-Marne) pour le S.I.A.P.P. Décanteur-épaississeur Ø 52 m.

Dans certains cas (manque de place, risque d'odeurs), l'épaississement est réalisé à l'intérieur même du décanteur d'eau brute: le décanteur-épaississeur comporte alors, en son centre, une zone importante d'épaississement, équipée d'un ensemble de raclage avec herse. La profondeur au centre de tels ouvrages peut varier de 6 à 9 m (figure 590).

L'arrivée des boues dans un épaississeur est réalisée, de préférence, par le haut, surtout dans le cas où les risques de bouchage sont importants.

1.1.3. Mise en oeuvre des épaississeurs

La sûreté et la souplesse d'emploi du système d'extraction de boues sont essentielles. Les vannes ou pompes d'extraction doivent être situées au plus près du puits central de boues (voir page 676).

La mise en place, sous le radier, d'une galerie d'accès à la fosse centrale de collecte des boues, est une disposition utile dans les épaississeurs de grand diamètre, en particulier dans le cas de boues très compactes ou thixotropiques.

L'épaississement est parfois mis en oeuvre avec un apport d'eau à l'entrée de l'appareil. Cette dilution peut avoir diverses finalités. Il peut s'agir d'une sorte de lavage (élutriation) pour réduire la consommation de réactifs minéraux de conditionnement, pour éliminer des matières colloïdales; de même, éventuellement, pour réduire une salinité excessive des boues avant incinération. Ces lavages de boues, s'ils sont pratiqués, entraînent généralement un accroissement sensible de la charge en tête de station, dû aux retours des trop-pleins d'épaississeurs.

De façon générale, pour assurer le renouvellement régulier de la tranche

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

liquide supérieure, et réduire ainsi les risques de dégagement d'odeurs, il est recommandé d'alimenter l'épaississeur de façon la plus continue possible, sans chercher à concentrer les boues dans le décanteur amont.

Dans le cas de stations d'ERI, avec des boues de densités très différentes traitées sur une chaîne de déshydratation unique, il est conseillé de prévoir

- une bâche de préhomogénéisation avant l'épaississeur,
- un recyclage du contenu de l'épaississeur sur lui-même, pour réduire l'effet de stratification néfaste au bon fonctionnement de la déshydratation.

L'automatisme des extractions peut être réalisé à partir de la détection du voile de boues ou de la concentration des boues extraites

.

1.2. ÉPAISSISSEMENT PAR FLOTTATION

L'épaississement statique par décantation a des performances très limitées sur les boues fortement organiques très fermentescibles (telles que les boues activées) et sur d'autres boues colloïdales (boues d'hydroxydes). L'épaississement par flottation présente alors des avantages décisifs

- réduction de la surface et du volume des ouvrages d'épaississement,
- production de boues épaissies plus concentrées.

La flottation à l'air dissous a été principalement utilisée jusqu'ici pour l'épaississement de boues activées, ainsi que pour la récupération de fibres cellulosiques ou de matières protéiniques, mais elle peut être également appliquée à des boues minérales hydrophiles (type hydroxyde d'aluminium par exemple) constituées de flocs de faible densité.

Cette technique entraîne une dépense énergétique supérieure, mais celle-ci est largement compensée par les bénéfices retirés dans l'exploitation et également le dimensionnement de toute la ligne de traitement de boues: ouvrages de stabilisation, équipements de déshydratation.

Le principe de la flottation à l'air dissous est donné au chapitre 3, page 175. Les flottateurs utilisés sont de forme circulaire ou rectangulaire. Les flottateurs circulaires (voir page 685) sont généralement plus performants; de par leur conception, ils permettent de développer "le champ gravitaire négatif", créé par le dégagement des microbulles, sur une plus grande surface de l'appareil. Le lit de boues est plus épais et mieux réparti et, de ce fait, les siccités sont plus élevées en surface.

Un conditionnement préalable de la boue, au moyen de polymères, améliore les performances; il est parfois indispensable. La mise en contact intime MES-polymères-bulles doit être alors très soignée.

1.2.1. Boues activées en excès

La pressurisation peut être de type direct ou indirect (voir figure 591).

Dans le système **direct,** c'est la boue elle-même qui est pressurisée. Le circuit de pressurisation et détente doit être conçu pour accepter les éléments véhiculés par la boue sans contraintes d'exploitation. Les avantages de ce procédé sont nombreux

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

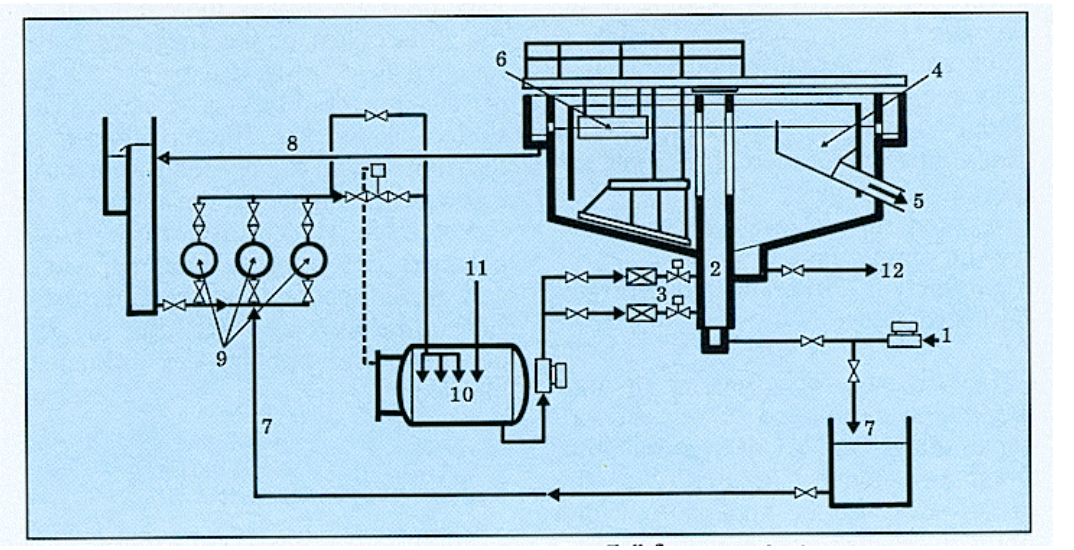
- siccité supérieure dans la majorité des cas,
- flux massique élevé (70 à 200 kg MES par m^2.j sur des boues activées),
- fonctionnement normalement possible sans polymère.

Dans le système **indirect,** semblable à celui utilisé en clarification d'eau, c'est de l'eau (soit extérieure au système, soit provenant de la sous-verse du flottateur) qui est pressurisée, puis détendue et mélangée aux boues à l'entrée du flottateur. Ce système convient pour les boues peu concentrées de (MES de 1 à 3 $g.l^{-1}$). Sur des boues brutes présentant une concentration en MES de 5 $g.l^{-1}$ par exemple, le débit d'eau pressurisée représente alors 80 à 100 % de celui des boues brutes.

Le taux maximal d'épaississement est obtenu avec une couche flottée épaisse.

L'usage de polymère (à des doses de 1 à 2 kg par tonne de MES) permet d'atteindre les flux massiques les plus élevés et améliore la concentration des boues flottées. Toutefois, la grande majorité des flottateurs-épaississeurs fonctionne sans polymères, surtout dans le cas de pressurisation directe. Les consommations d'air comprimé varient de 0,01 à 0,025 kg d'air par kg de MS.

Les concentrations de boues activées en excès flottées sont souvent comprises entre 3,5 et 5 % soit, grosso modo, plus de 1,5 fois celles obtenues par simple décantation. La consommation énergétique globale des postes de flottation varie de 200 à 400 kWh par m^3 de boue. Les performances des flottateurs sont directement dépendantes de la structure physique du floc. Les concentrations de boues flottées les plus for-



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tes sont obtenues avec les boues présentant des indices de MOHLMAN faibles.

La sous-verse du flottateur est en général un peu plus chargée en système direct (MES 80 à 250 $mg.l^{-1}$) qu'en système indirect (MES 30 à 150 $mg.l^{-1}$). L'usage de polymère permet d'améliorer encore cette clarification.

Dans les cas exceptionnels (traitement de certaines ERI concentrées) où la clarification de la liqueur de boues activées est réalisée par flottation, aucun épaississement supplémentaire des boues en excès n'est nécessaire.

Dans les stations d'épuration ERU, la flottation peut aussi être mise en oeuvre pour l'épaississement des boues mixtes fraîches. Les concentrations de boues flottées atteignent alors 5 à 8 %, mais l'intérêt de cette solution n'est pas toujours établi et la disposition la plus usuelle est celle de l'épaississement gravitaire des boues primaires et de l'épaississement par flottation des boues activées en excès (figure 593).

Figure 592. Installation de LILLE-MARQUETTE (Nord) pour la Communauté Urbaine de Lille. Capacité: 750 000 éq. habitants. Poste de flottation de boues activées (flottateur Ø 11 m).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

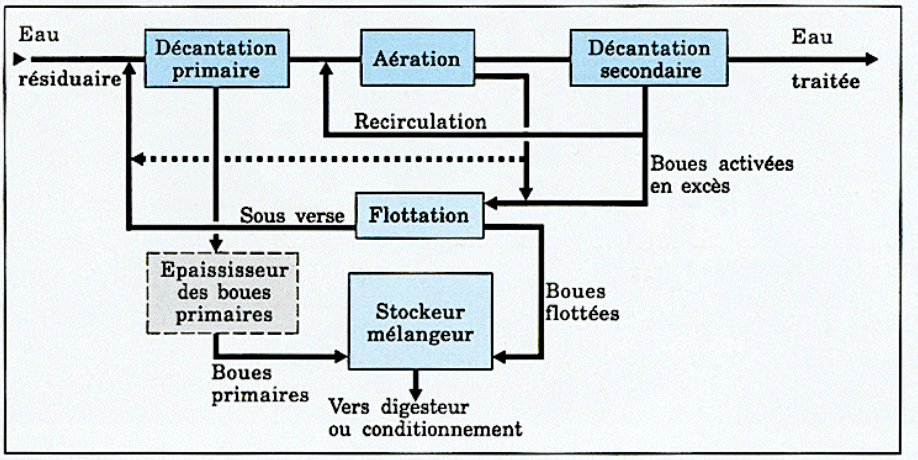


Figure 593. Épaississement par flottation de boues activées dans une station d'épuration d'ERU.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.2. Boues d'eau potable

Les boues provenant de la décantation, après floculation, d'eau de surface sont généralement peu concentrées. La flottation permet d'atteindre rapidement des taux d'épaississement nettement supérieurs à ceux obtenus par simple décantation de ces boues, constituées essentiellement d'hydroxydes métalliques.

La pressurisation est, le plus souvent, assurée suivant le système indirect Le débit d'eau pressurisée recirculée est généralement inférieur à 50 % du débit traité. Un adjuvant de flottation est nécessaire, à des doses de (ordre de 2 kg de polymère par tonne de MS. L'utilisation d'alginate de sodium est envisageable.

Il est ainsi possible de décupler la concentration de boues extraites à 2 - 3 $g.l^{-1}$. Le flux massique varie de 50 à 150 kg MES/ m^2.j suivant la nature et la concentration initiale de la boue (en particulier présence ou non d'eaux de lavage de filtres).

Dans le cas où la clarification de l'eau est réalisée par flottation, un deuxième flottateur n'est évidemment pas nécessaire.

1.2.3. Mise en oeuvre de flottateurs-épaississeurs

Les boues épaissies étant disponibles à la surface de (appareil (figure 595), le contrôle de leur extraction en est facilité. Le nombre de racleurs par unité de surface doit être élevé et, pour de grands appareils (Ø > 14 m), deux trémies de réception sont nécessaires, chacune devant être équipée d'un pompage de reprise.

Figure 594. Installation du LAC-DE-BRET (Suisse). Débit: 1000 $m^3.h^{-1}$. Flottation des boues provenant de la clarification d'eau potable.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 595. Installation du LAC-DE-BRET (Suisse). Sortie des boues épaissies sur un flottateur de boues.

Le choix approprié de la vitesse et de la cadence de raclage permet de contrôler la hauteur du lit de boues, dont la valeur optimale peut varier entre 0,30 m et 1 m.

Les flottateurs de boues acceptent des arrêts d'alimentation et de pressurisation relativement longs (plusieurs heures), mais une alimentation continue ou pseudo-continue est préférable. Les postes de flottation peuvent être entièrement automatisés et ne nécessiter aucun personnel d'astreinte. Pour la fiabilité du procédé, il n'est pas nécessaire de couvrir les flottateurs même dans des régions pluvieuses.

1.3. ÉPAISSISSEMENT PAR CENTRIFUGATION

Desdécanteuses continues, de conception particulière (décanteuses cylindriques à buses par exemple) ou à paramètres constructifs adaptés, sont utilisables pour épaissir les boues biologiques en excès (voir page 1015). Les siccités des boues épaissies varient de 4 à 8 %, mais le rendement d'extraction est généralement inférieur à celui obtenu par flottation.

L'emploi de polymères (de 1 à 3 kg par tonne de MES) est utile, surtout si l'on désire obtenir un centrifugat peu chargé. La consommation de réactifs est aussi très dépendante des variations de concentration de la boue entrante. Le procédé est beaucoup plus sensible que la flottation aux changements de caractéristiques de la boue. La consommation d'énergie, sur des boues activées en excès, est de 800 à 1500 Wh par m^3 de boue. Par contre, l'installation est très compacte.

1.4. ÉPAISSISSEMENT PAR DRAINAGE

La réduction en volume des boues est devenue aussi un objectif prioritaire dans les petites et moyennes stations. Les techniques d'épaississement précédemment décrites y conduisent souvent à des ensembles trop coûteux et/ou trop exigeants en main-d'oeuvre spécialisée. Par ailleurs, un des objectifs recherchés sur les stations d'épuration évacuant, de façon saisonnière, leurs boues en culture, est de disposer de boues, certes épaissies, mais aisément pompables et épandables par les moyens habituels (ex. tonne à lisier).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'épaississement par drainage est une solution intéressante. Différents dispositifs peuvent être utilisés (tambour, poches filtrantes, etc.) mais la grille GDE est l'appareils qui allie à la fois simplicité d'emploi et fiabilité (figure 596).

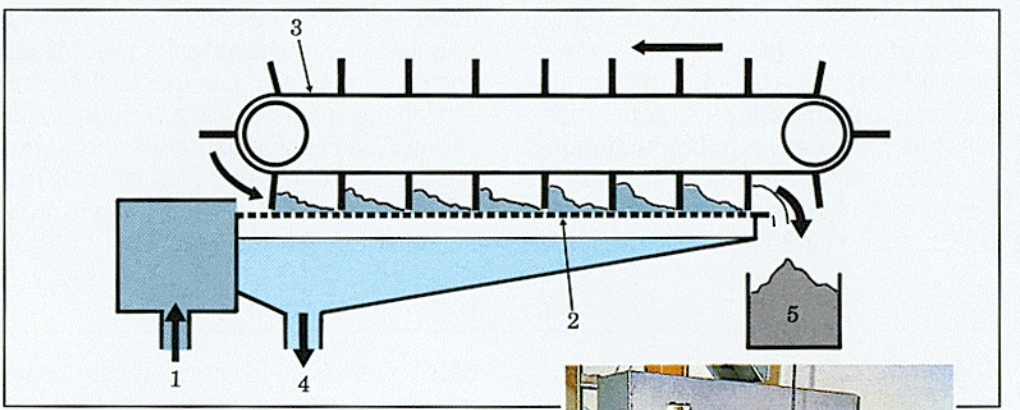
Cet appareil, à fonctionnement continu, est placé directement au refoulement de la pompe d'alimentation en boues fraîches. La boue, préalablement floculée, est épandue sur un champ horizontal de grille fine, raclé en permanence par des lames en caoutchouc.

La concentration de la boue augmente progressivement en avançant sur le champ de grille. Le réglage est optimal lorsque la boue ne contient plus d'eau libre en fin de parcours. Le débit de la pompe d'alimentation, ainsi que la vitesse de raclage de la grille, sont réglables. Le lavage de la grille est réalisé de façon cyclique au moyen de pulvérisation d'eau sous pression.

L'apport d'agent de floculation s'effectue à travers un mélangeur statique placé en aval de la pompe à boues. La consommation de polymère est relativement élevée, au voisinage de 5 kg par tonne de MES, mais cette dépense demeure faible sur de petites stations, surtout eu égard aux avantages que présente cet épaississement

- soutirage direct de boues en excès peu concentrées depuis le bassin d'aération et suppression de silos intermédiaires.
- réduction de 2 à 3 fois du volume de stockage des boues avant leur reprise en cultures,
- réduction comparable du coût de transport des boues.

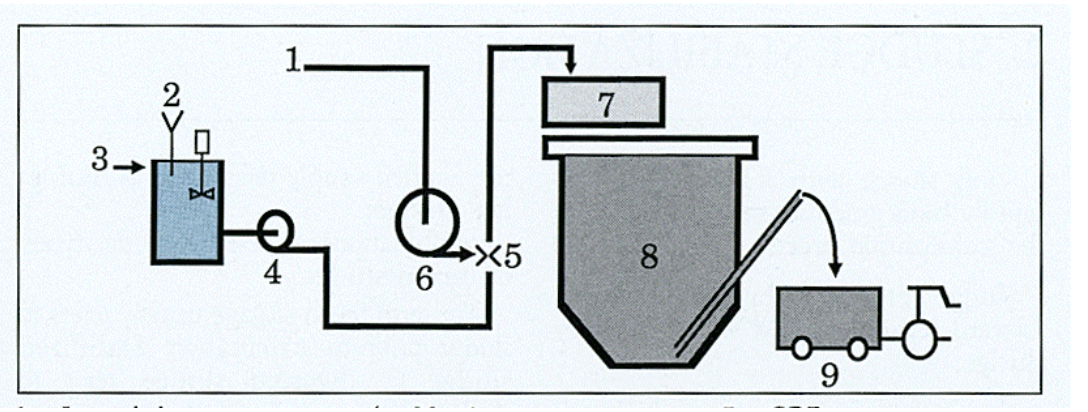
La grille GDE peut être placée, soit au niveau du sol avec reprise des boues épaissies par pompage, soit directement sur le stockeur de boues épaissies. Cette dernière disposition est particulièrement simple (figure 597).



1 - Arrivée des boues.
2 - Grille d'égouttage.
3 - Raclage.
4 - Sortie d'eau.
5 - Sortie des boues épaissies.

Figure 596. Grille GDE.
Vue d'ensemble et schéma simplifié.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



Les performances des grilles GDE sont les suivantes.

Nature et concentration des boues brutes en MES	**Capacité en kg.h^{-1} de MES par mètre de largeur de grille**	**Siccité des boues épaissies** en %
1. ERU		
Aération prolongée		
<10 g.l^{-1}	30à70	5à6
>10g.1^{-1}	60à200	5à8
Digestion anaérobie		
15à25g.1^{-1}	70à140	7,5à9
2. Laiteries		
Filtre bactérien		
+ aération prolongée		
30g.1^{-1}	140à180	7à8
3. Clarification		
Hydroxydes d'aluminium		
10 à 15 g.l^{-1},	25 à 35	2,5 à 4,5

Comme il n'y a pas de pressage, le rendement d'extraction est toujours élevé et dépasse 95 %. La grille GDE peut aussi être utilisée comme préépaississeur en amont immédiat d'un appareil de déshydratation (filtre à bande, centrifugeuse, filtre-presse), ou pour une séparation solide-liquide dans des procédés de fabrication industrielle.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. STABILISATION DES BOUES

Une stabilisation n'est évidemment mise en ouvre que sur des boues dont la teneur en matières rapidement biodégradables est importante, c'est-à-dire

- boues de simple décantation d'eaux résiduaires urbaines, ou "**boues primaires**",
- boues de traitement biologique aérobie à moyenne et forte charge (boues activées en excès, boues de lits bactériens, boues provenant du lavage de biofiltres à lit granulaire), appelées souvent de façon succincte "**boues biologiques**",
- mélange des deux types de boues précédents ou "**boues mixtes**".

L'appellation de **boues fraîches** est en général donnée à des boues avant stabilisation, celle de boues stabilisées, ou de boues digérées, à des boues après stabilisation. L'usage veut que le terme digérées soit le plus souvent réservé aux boues stabilisées par voie anaérobie.

2.1. DIGESTION ANAÉROBIE

La fermentation méthanique (voir page 316) a un pouvoir de destruction cellulaire parmi les plus puissants du monde biologique, et permet l'élimination d'une quantité importante de M0.

La digestion anaérobie des boues est normalement mise en ouvre sans recyclage de boues digérées épaissies, les boues fraîches présentant par elles-mêmes une concentration initiale suffisante en M0, qui permet ensuite la synthèse de la flore bactérienne.

2.1.1. Production de gaz

La production de gaz est le critère le plus représentatif et le plus simple de la qualité de la digestion. Elle dépend principalement de deux facteurs

- la température,
- le temps de séjour

Le gaz est composé essentiellement de CH_4 (65 à 70 %) et de CO_2 (25 à 30 %)

D'autres éléments peuvent être présents en faible proportion: C0, N_2, O_2, hydrocarbures et H_2S.

La figure 598 indique la quantité de gaz obtenue lors de la digestion de 1 kg de MO à différentes températures. Dans les installations d'épuration d'ERU on se fixe

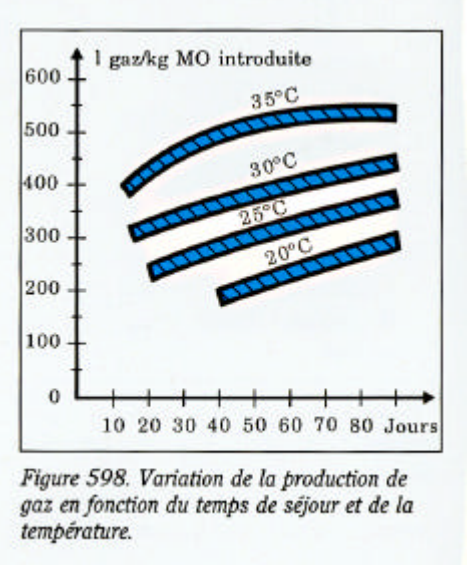


Figure 598. Variation de la production de gaz en fonction du temps de séjour et de la température.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

généralement pour but d'obtenir, par digestion, une réduction de 45 à 50 % de la teneur en MO.

Comme 1 kg de MO **détruite**, contenue dans les eaux usées urbaines, conduit à une production de 900 à 1000 l de gaz, la production de gaz d'une digestion bien équilibrée est donc de l'ordre de 400 à 500 1 de gaz par kg de MO **introduite**.

L'influence de la température est déterminante sur le bon fonctionnement d'une digestion: rapidité de démarrage, stabilité de la fermentation, production de gaz. On ne peut supprimer les dispositifs de chauffage de la boue que sur des installations de petite capacité (quelques milliers d'habitants), prévues avec des temps de séjour très importants.

La fermentation **mésophile**, au voisinage de 35 °C, est celle généralement mise en oeuvre ; la fermentation thermophile est rarement utilisée car, si elle permet normalement une réduction des volumes de réacteurs et une plus forte élimination des germes pathogènes, le bilan énergétique est par contre moins favorable, et le procédé plus sensible aux variations de charge.

Le PCI du gaz de digestion varie avec la proportion de méthane et augmente le plus souvent avec le temps de digestion.
Il est compris entre 22600 et 25100 $kJ.Nm^{-3}$ (5400 et 6000 $kCa1.Nm^{-3}$).

2.1.2. Paramètres influant sur le rendement de la digestion anaérobie

Du fait de l'absence de recyclage de boues digérées décantées dans le réacteur, et du très faible épaississement desboues dans celui-ci, le temps de séjour (rapporté au débit journalier entrant de boues fraîches) est un élément essentiel de dimensionnement, en dehors de la **température.**

Un temps de séjour satisfaisant est obtenu - avec un volume suffisant du réacteur, - une concentration élevée des boues fraîches.

Le démarrage des réactions biochimiques est d'ailleurs facilité par une concen-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 599. Installation de BARUERI (Brésil) pour la aille de SAO PAULO. Capacité: 160 t.j^{-1} de boues. 8 digesteurs de 10 000 m^3 de volume unitaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tration élevée et on peut considérer que, industriellement, une concentration de 15 $g.l^{-1}$ en MS constitue une limite inférieure sur des boues résiduaires urbaines.

Deux autres paramètres améliorent le rendement et la conduite d'un digesteur de boues

- l'intensité du brassage - qui est beaucoup plus utile pour la méthanisation de boues (visqueuses) que pour celle d'effluents. Un brassage efficace réduit les écarts de température et de concentration en MO (boues fraîches et boues digérées) dans la masse du digesteur, et multiplie les chances de rencontre entre micro-organismes et matières à dégrader. Le décalage qui peut exister entre le rendement de digesteurs de laboratoire et celui, plus faible, de digesteurs industriels, s'explique souvent par la différence de (intensité de brassage,

- **la régularité de l'alimentation** - apport de boues fraîches et soutirage de boues digérées doivent être réguliers, de façon à éviter les à-coups dans le développement des micro-organismes.

Par ailleurs, la teneur en MO de la boue fraîche, ainsi que la nature de ces M0, influent sur le rendement d'élimination de celles-ci. Normalement les rendements les plus élevés sont obtenus avec les teneurs initiales en MO les plus fortes. Les rendements d'élimination peuvent s'abaisser à 35-40 % avec certaines boues fraîches présentant des teneurs en MO de 50 à 55 % seulement.

2.1.3. Résultats et avantages de la digestion

Les boues fraîches des effluents urbains ont une couleur grise ou jaunâtre; elles contiennent des matières fécales, des débris de légumes, des papiers, etc. Elles sont malodorantes. Les boues dont la digestion est achevée, ont une couleur noire (sulfure de fer) et dégagent une odeur proche de celle du goudron. On ne peut plus distinguer pratiquement leurs constituants initiaux (à l'exception des cheveux, poils, certaines graines et certains déchets plastiques de faible dimension). 90 % des salmonelles et de la plupart des germes pathogènes sont détruits, mais (élimination des virus semble un peu moins bonne. **La manipulation à l'air libre des boues digérées n'entraîne pas de nuisance.**

Si l'on appelle:

- m_1 le pourcentage de matières minérales des boues fraîches,
- m_2 le pourcentage de matières minérales des boues digérées,

la réduction x de MV obtenue par la digestion s'obtient par la relation

$$x = 1 - \frac{m_1\,(100 - m_2)}{m_2\,(100 - m_1)}$$

Une réduction de 45-50 % de la teneur en MO correspond sensiblement, sur les boues d'ERU, à (élimination du tiers des matières sèches. Les installations de déshydratation des boues sont réduites en conséquence.

La digestion anaérobie présente (avantage de fournir de (énergie sous une forme stockable : le gaz méthane, dont la quantité produite à pleine charge est normalement très excédentaire par rapport aux besoins thermiques de (installation de digestion. Le stockage, à (échelle de la journée, est réalisé généralement dans des gazomètres à cloche (au voisinage de la pression atmosphérique) ou dans des sphères sous pression de quelques bars.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 600. Installation de BARUERI. Vue des digesteurs et d'un gazomètre de 5000m' de volume.

En dehors de l'utilisation à des fins de chauffage, l'excédent de gaz peut conduire à une production importante d'énergie électromécanique (voir page 13 2 4). Une station de simple décantation primaire d'ERU avec digestion peut être ainsi largement autonome en énergie électrique. Une station d'épuration avec traitement biologique peut avoir une gestion énergétique équilibrée si le mode d'aération est économe en énergie (boues activées avec diffusion d'air par fines bulles, lits bactériens par exemple) et si le traitement des boues est simple.

D'autre part, la capacité tampon que représentent les digesteurs régularise le fonctionnement des installations de traitement de boues placées en aval. Enfin, le stockage à l'air libre des boues digérées dans de simples lagunes est possible sans nuisance olfactive. Cet avantage, et celui d'une autonomie énergétique, même partielle, de la station, sont des facteurs importants de fiabilité, pour assurer la permanence de la fonction épuratoire.

2.1.4. Types et dimensionnement des digesteurs de boues

Le plus ancien type de digesteur de boues est la fosse à deux étages, ou fosse IMHOFF (ou encore fosse EMSCHER), combinant un décanteur primaire dans sa partie supérieure et un digesteur non chauffé dans sa partie inférieure. Il était principalement adapté aux petites installations et n'est pratiquement plus utilisé aujourd'hui, du fait de la généralisation des procédés d'aération prolongée, moins sensibles à la température et plus performants sur le plan épuratoire. L'installation de digestion peut être à moyenne ou forte charge. Les installations à forte charge comportent généralement deux stades (l'un fortement brassé, l'autre peu). Par contre, la séparation des phases de fermentation proprement dite (acide d'une part, acétogène-méthanogène d'autre part) est rarement mise en oeuvre pour la digestion des boues, du fait des temps de séjour relativement impor-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tants qui, de toutes façon, sont nécessaires (voir page 319).

Dans un digesteur à **moyenne charge**, on cherche à obtenir, dans le même réacteur, une digestion complète, un certain épaississement de la boue digérée et la séparation de flottants (chapeau). Le brassage y est donc relativement faible et intermittent. La température est le plus louvent voisine de 25 °C. Ce type de digesteur est surtout adapté à des installations d'importance modérée et à des boues fraîches non épaissies.

Avec une digestion à **forte charge,** on cherche à réduire le temps de digestion, et l'installation comprend au moins un réacteur primaire au sein duquel sont maintenus un brassage puissant et une température constante, proche de 3 5 °C en digestion mésophile.

Un réacteur de deuxième stade (secondaire), qui n'est brassé que de façon intermittente, a plusieurs utilités

- permettre la méthanisation complète des particules ayant séjourné peu de temps dans le digesteur primaire fonctionnant à la façon d'un réacteur à mélange intégral,
- séparer et évacuer les flottants,
- faciliter un certain épaississement de la boue (avec évacuation d'un surnageant appelé parfois "water band").

La digestion à haute charge est de préférence alimentée avec des boues fraîches préalablement épaissies.

Le tableau ci-après donne les gammes de dimensionnement habituelles des digesteurs de boues.

	DIGESTEUR PRIMAIRE		**DIGESTEUR SECONDAIRE**
	Charge MO en $kg.m^{-3}$ J^{-1}	**Temps séjour** en j.	**Temps séjour** en j.
Moyenne charge (25 °C)	0.8 à 1.2	30 à 40	-
Forte charge (35 °C) 1 stade	1.5 à 2	2 0 à 2 5	-
Forte charge (35 °C) 2 stades	2 à 3	12 à 16	3 à 4

Quant aux digesteurs non chauffés, leurs bases de dimensionnement sont extrêmement aléatoires. Elles dépendent beaucoup des conditions climatiques et des conditions d'exploitation. Même dans les régions tempérées d'Europe occidentale, le processus de digestion est pratiquement stoppé pendant 3 à 6 mois de l'année. La capacité de digestion doit alors correspondre à une rétention minimale de 90 jours.

2.1.5. Conception des digesteurs de boues

2.1.5.1. Brassage des digesteurs

La technique la plus efficace, avec un génie aval économique, est celle du **brassage au gaz**.

Le gaz est recirculé et introduit sous pression au sein de la masse de boues. Si cette injection de gaz est concentrée dans la zone centrale et à la base du digesteur,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

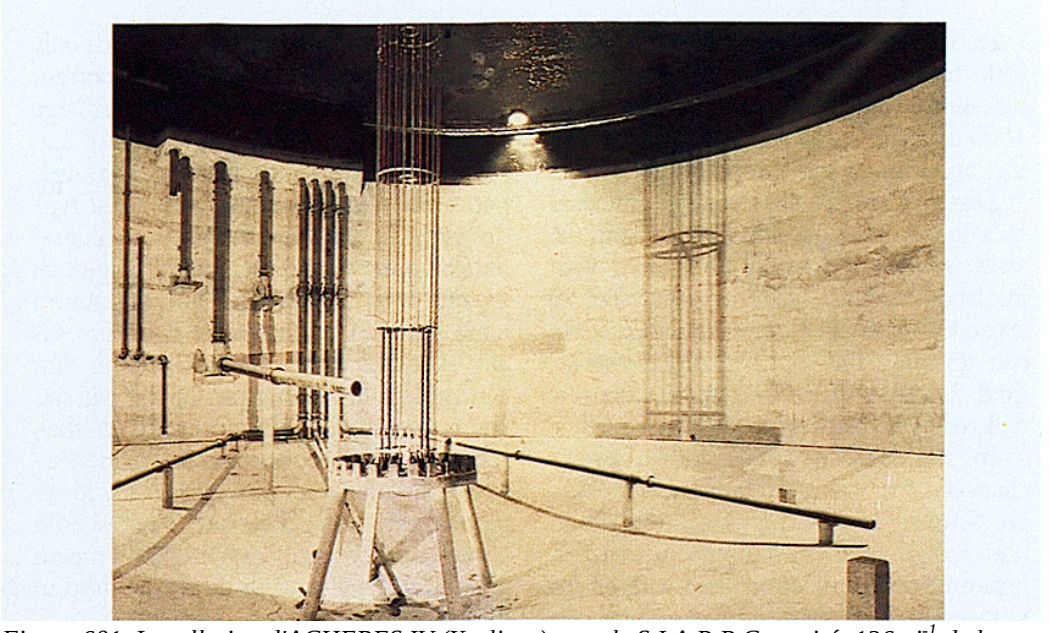


Figure 601. Installation d'ACHERES IV (Yvelines) pour le S.I.A.P.P Capacité: 136 t.j^{-1} de boues digérées. Vue intérieure d'un digesteur secondaire Ø 33 m.

il se produit, pour des rapports convenables diamètre/hauteur de l'ouvrage, un brassage "torique" puissant, du centre vers la périphérie. Le débit de gaz prélevé dans le gazomètre ou dans la coupole du digesteur pour assurer ce brassage est d'au moins 0,8 m^3/h.m^2. DEGRÉMONT a normalisé ces dispositifs de brassage, équipés de cannes plongeantes et de diffuseurs spéciaux (figure 601).

La cote d'introduction du gaz recyclé varie suivant le diamètre et le type de digesteur (moyenne ou forte charge).

2.1.5.2. Chauffage des digesteurs

Le mode de chauffage le plus sûr est celui par échangeurs extérieurs, alimentés en eau chaude et montés sur un circuit de recirculation des boues en cours de digestion. Les boues fraîches sont mélangées, avant leur entrée dans le digesteur, aux boues en cours de digestion recirculées.

On utilise, de préférence, des échangeurs tubulaires (figure 602) dans lesquels les vitesses élevées de circulation de la boue (1 à 1,5 m.s^{-1}) et de l'eau chaude (1,5 à 2,5 m.s^{-1}) permettent d'obtenir des coefficients d'échange pouvant atteindre 4 300 kJ (ou 1000 kcal)/ °C.m^2.h. Des échangeurs en spirale, où la vitesse de circulation ainsi que les sections de passage sont plus faibles, peuvent aussi être utilisés moyennant certaines précautions d'emploi.

En plus du réchauffage des boues fraîches, le système de chauffage doit compenser les pertes calorifiques extérieures. Les coefficients de transfert sont fonction des matériaux et des conditions d'implantation dans le sol (exemple de l'influence très défavorable d'une nappe baignant la base du digesteur).

En première approximation, dans les pays tempérés, on peut admettre des pertes

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

calorifiques extérieures de 2100 à 2 500 kJ (500 à 600 kcal)/m^3.j pour des capacités inférieures à 1000 m^3 , et de 1250 kJ (300 kcal)/m^3.j pour des capacités supérieures à 3000 m^3.

L'isolation des digesteurs est obtenue généralement avec une double paroi; l'espace intermédiaire étant vide ou rempli d'isolant (laine de verre, matériau expansé). Des parois composites sont aussi réalisées sur de grands ouvrages. La construction en béton est avantageusement remplacée par une construction en acier avec protection adaptée.

La température de l'eau chaude peut atteindre 90 °C dans les échangeurs tubulaires à vitesse rapide, mais ne doit pas dépasser 60 °C dans les échangeurs à vitesse lente. Les chaudières à gaz doivent être équipées de brûleurs de secours à fioul ou à propane (nécessaires, en particulier, lors de la mise en route).

2.1.5.3. Forme des digesteurs

Un brassage au gaz bien dimensionné permet de réaliser des digesteurs à grande section horizontale et à radier à faible pente, surtout s'il s'agit de digesteurs à forte charge. La présence d'une grande surface libre facilite le dégazage et réduit considérablement les risques de moussage très fréquents, surtout à la mise en route, sur des digesteurs de type "vertical". La vidange périodique des digesteurs de boues doit, de toute façon, faire partie du programme normal d'entretien. Un temps maximal, entre visites, de 10 à 12 ans est souvent adopté, pour évacuer les sables et limons qui, à la longue, s'accumulent dans le fond des ouvrages et en réduisent la capacité. Des portes de visite prévues à la base des ouvrages facilitent cette opération. Un dessablage soigné de l'eau brute est d'ailleurs toujours recommandé, car il ralentit fortement la réduction de la capacité utile des digesteurs.

La couverture est le plus souvent réalisée sous forme de coupole fixe. Des toits flottants peuvent également être utilisés, mais ils entraînent un investissement et des sujétions d'entretien assez importants.

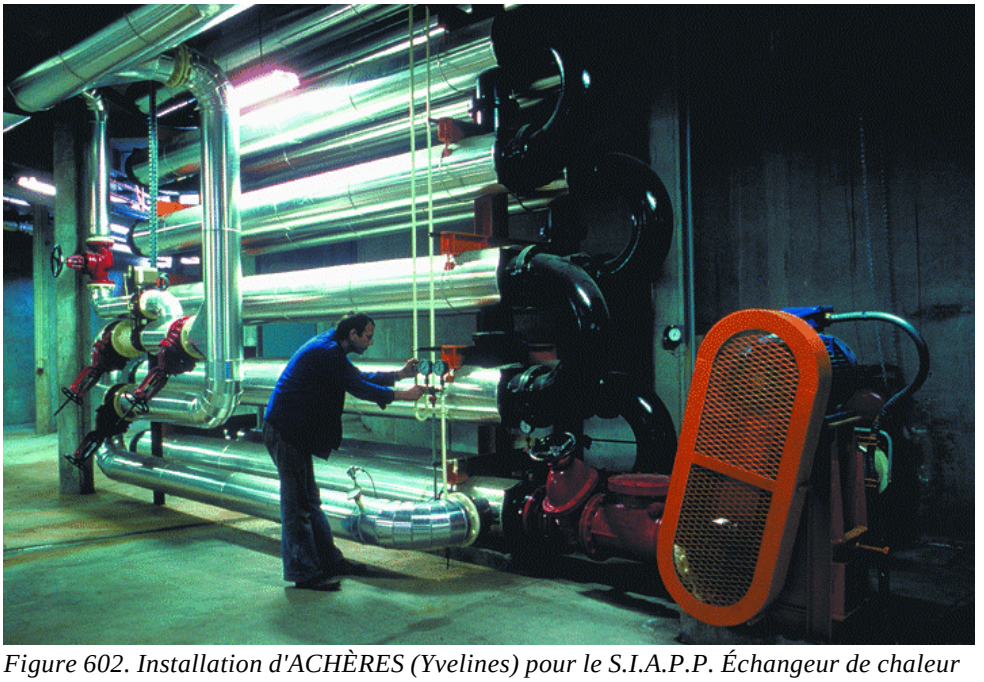
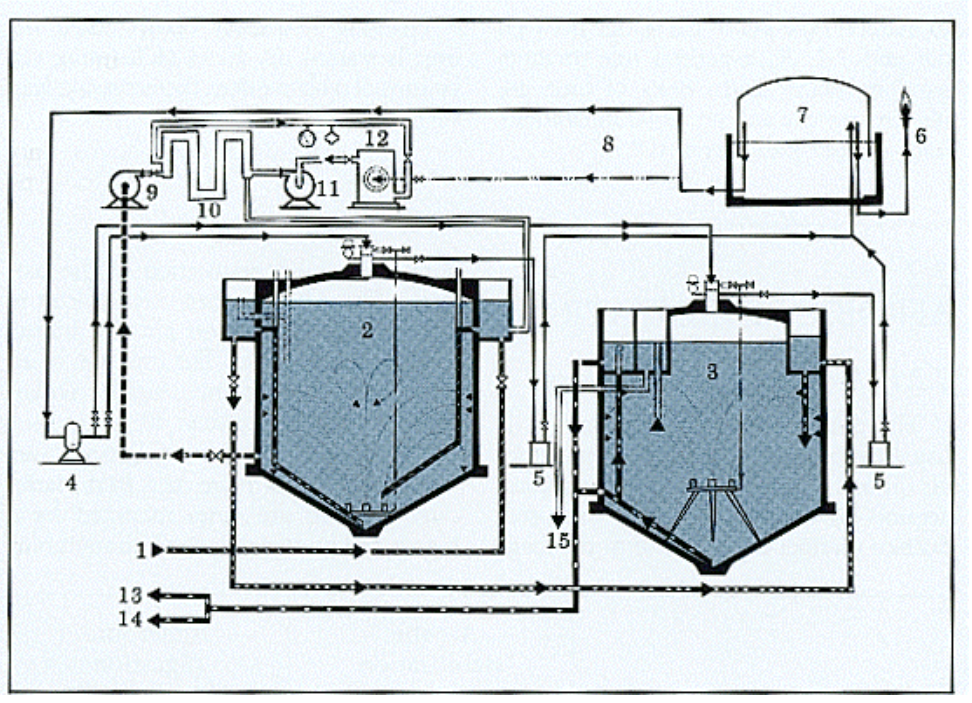


Figure 602. Installation d'ACHÈRES (Yvelines) pour le S.I.A.P.P. Échangeur de chaleur pour le chauffage des boues de la digestion.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Arrivée des boues fraîches.
2 - Digesteur primaire.
3 - Digesteur secondaire.
4 - Compresseur de gaz.
5 - Pots de purge.
6 - Torchère.
7 - Gazomètre.
8 - Vers la chaufferie et les surpresseurs.
9 - Pompe de circulation des boues.
10 - Échangeur de chaleur.
11 - Pompe à eau chaude.
12 - Chaudière.
13 - Vers le traitement terminal.
14 - Vers le lagunage.
15 - Surnageant éventuel.

Figure 598. Schéma de digestion en deux stades à brassage au gaz

2.1.5.4. Organisation générale

La figure 603 donne le schéma d'un poste de digestion de boues, à forte charge, en deux stades.

Dans le cas de digesteur unique à moyenne charge, la conception du réacteur est proche de celle du digesteur secondaire d'un poste à deux stades, mais inclut un dispositif de réchauffage des boues.

2.1.5.5. Démarrage et conduite d'une installation de digestion

Les règles générales, données au chapitre 12, page 75 7, pour le contrôle des installations de méthanisation comportant un réacteur unique, sont applicables. Toutefois, du fait de la forte viscosité des suspensions, le rôle du brassage est particulièrement important. Le brassage de la masse de boues d'un digesteur primaire est maintenu en continu, à partir du moment où la concentration en MES dans le digesteur atteint une valeur d'environ 2 5 $g.l^{-1}$.

Le chauffage du digesteur à 3 5 °C, dès le

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

démarrage, est particulièrement recommandé. Le maintien du pH de la boue entre 6,8 et 7,2 peut nécessiter, pendant les premières semaines, une injection de chaux. La règle d'une injection de 8 kg de chaux par jour et pour 1000 habitants, tant que le pH n'a pas été stabilisé à 6,8, est un guide souvent utile pour une installation à forte charge.

Les phénomènes de moussage sont fréquents au démarrage; une montée en charge très progressive réduit fortement ce risque.

2.2. STABILISATION AÉROBIE

2.2.1. Conception et dimensionnement

La stabilisation aérobie est normalement mise en oeuvre dans des ouvrages ouverts à l'air libre. Les systèmes d'aération utilisés sont, soit des diffuseurs d'air (VIBRAIR par exemple), soit des aérateurs de surface (ACTIROTOR). Ces derniers peuvent provoquer, à la longue, une certaine destruction mécanique du floc biologique rendant plus difficile sa déshydratation ultérieure; ils conduisent aussi à de plus fortes pertes calorifiques. L'insufflation d'air permet également de brasser des boues de plus forte concentration (pouvant dépasser 30 $g.l^{-1}$).

Les stabilisateurs (ou digesteurs) aérobies sont composés d'une ou de plusieurs cellules. Dans ce dernier cas, la disposition des cellules en série permet normalement d'atteindre un taux de stabilisation plus élevé et plus homogène.

Comme indiqué au chapitre 4, page 305. le taux de minéralisation des boues

	Stabilisation aérobie	**Digestion anaérobie**
Produits de dégradation	CO_2, H_2O, NO_3	CH_4, CO_2, H_2O, NH_4^+
Énergie libérée dans le milieu liquide par g. de MO éliminée	20 kJ	0,8 kJ
Énergie produite sous forme de gaz par g. de MO éliminée	-	20,9 kJ
Vitesse de dégradation	+	-
Réduction finale de MO	-	+
DBO_5 du surnageant (filtré)	30-50 $mg.l^{-1}$	200-400 $mg.l^{-1}$
Résistance aux agents inhibiteurs	+	-
Possibilité stockage longue durée	-	+
Filtrabilité des boues	-	+

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

dépend essentiellement du temps de séjour, de la température, ainsi que de l'âge des boues introduites. Dans les pays froids, la stabilisation aérobie est donc déconseillée, tout au moins si l'on ne prend pas des dispositions spéciales: isolation et couverture du réacteur, chauffage éventuel. Dans les conditions climatiques les plus fréquentes, la réduction du taux de MO dans les boues obtenues par

stabilisation aérobie est très sensiblement inférieure à celle atteinte par digestion anaérobie. Le tableau ci-après résume les qualités comparées des deux procédés.

Les bases de calcul suivantes, données pour une température de 20 °C, permettent une première approche du dimensionnement

- Temps de séjour (en jours) -Boues activées moyenne charge sans décantation

primaire : 12 à 18

- Boues primaires + boues lits bactériens ou + boues activées moyenne charge ; 15 à 20

- Charge MO en $kg.m^{-3}$ de stabilisateur par jour :2

- Besoins en oxygène kg/j^{-1} par kg de MO présente dans le stabilisateur :0,1

Le coefficient de transfert d'oxygène est évidemment faible par rapport à celui existant dans l'eau claire, du fait de la forte concentration de la liqueur. Toute fois, le plus souvent, ce sont les conditions de brassage minimal qui fixent la puissance d'aération à installer. Avec des aérateurs à axe vertical et vitesse lente, cette puissance est de 30 à 40 Watts par m^3 de bassin. C'est pourquoi l'apport d'oxygène est réalisé généralement de façon syncopée. Dans le cas d'insufflation d'air, on prévoit souvent, pour les mêmes raisons, une puissance d'aération correspondant à 5 à 6 $m^3.h^{-1}$ d'air par m^2 de bassin. Ces puissances sont données pour des concentrations de boues de 15 $g.l^{-1}$ environ. Les formes des stabilisateurs aérobies doivent faciliter le balayage hydraulique

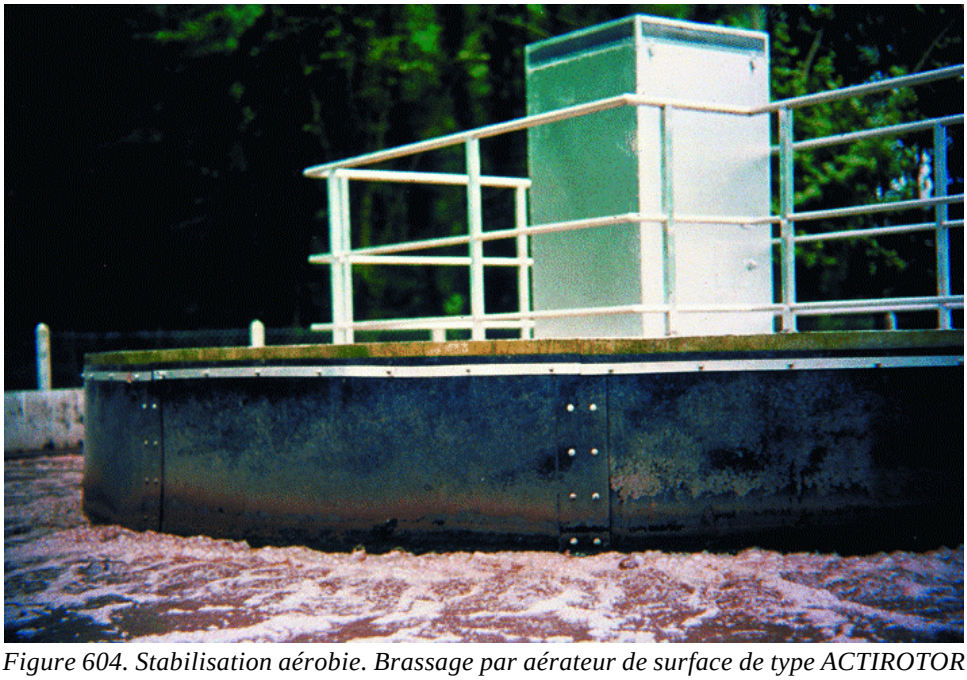


Figure 604. Stabilisation aérobie. Brassage par aérateur de surface de type ACTIROTOR équipé d'une jupe et d'un capot anti-bruit.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

du radier des ouvrages. La capacité de pompage des aérateurs mécaniques doit être élevée.

2.2.2. Conduite d'une installation

Sur des installations importantes, l'épaississement préalable des boues facilite la conception et l'exploitation d'un poste de stabilisation aérobie. Il permet une alimentation très régulière du stabilisateur et facilite l'automation de l'ensemble de l'unité. Par contre, les puissances de brassage sont, dans ce cas, plus élevées.

Si l'épaississement est réalisé dans la même enceinte que la stabilisation, il est préférable de disposer de deux unités travaillant alternativement en phase de décantation (suivie des soutirages de fond et de surface) et en phase d'aération (précédée de l'alimentation en boues). Comme il n'y a qu'un bassin, l'aération par insufflation est préférée; les aérateurs mécaniques (sauf s'ils sont flottants) ne sont en effet opérationnels que sur une plage de niveau très restreinte. L'évacuation du surnageant après décantation est souvent prévue à plusieurs niveaux.

Le stabilisateur peut jouer aussi un certain rôle de stockeur. Le mode d'aération doit être adapté aux variations de niveau. Le volume de l'ouvrage est essentiellement dépendant de la cadence d'enlèvement des boues stabilisées, ce qui rend cette solution difficilement applicable au cas d'utilisation agricole directe des boues. On utilise alors des stockeurs statiques séparés, où il est difficile, en l'absence d'aération, d'éviter une certaine reprise de fermentation malodorante. Cette fermentation est nuisible à la filtrabilité de la boue. La situation est pire si cet ouvrage, situé en aval, a une fonction d'épaississeur, car les surnageants, retournant en tête de station, peuvent être extrêmement chargés.

Suivant le pouvoir tampon de l'eau et l'importance du temps de séjour, le pH des boues stabilisées peut descendre plus ou moins bas. Des valeurs nettement inférieures à 6 peuvent être constatées. Ce phénomène est lié au processus de nitrification. Cette baisse de pH ne paraît pas inhiber l'activité bactérienne, mais il est néanmoins conseillé de vérifier le pH de temps à autre.

Durant les premières semaines, ou même les premiers mois, de fonctionnement, on constate fréquemment un moussage important. L'écume, chargée de matières, peut atteindre une épaisseur de 20 à 30 cm et est associée à plusieurs phénomènes: nitrification-dénitrification, dégradation insuffisante des matières protéiniques ou tensio-actives, concentration en lipides et présence de bactéries filamenteuses diverses. La forte concentration en boues favorise la formation d'une écume très compacte. Bien que, généralement, ce phénomène désagréable décroisse avec la mise en régime de l'installation, il est conseillé de prévoir un mode d'évacuation périodique de ces écumes flottantes dont la concentration en MS peut être très élevée (supérieure à 10 %).

2.2.3. Stabilisation aérobie thermophile

(souvent appelée digestion aérobie thermophile)

Cette technique est semblable à celle utilisée pour le compostage de déchets organiques solides. Elle utilise le caractère exothermique des réactions d'oxydation pour accroître la température dans le réacteur; cette montée de température élève la vitesse de réaction et peut, si elle

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

est suffisante, permettre une certaine décontamination de la boue en germes pathogènes. Les systèmes de stabilisation aérobie thermophile travaillent entre 45 et 60 °C.

Pour obtenir une température suffisante dans le réacteur, des dispositions particulières doivent être prises pour limiter les pertes calorifiques. La première condition est de disposer de boues fraîches présentant une concentration minimale en MO: 25 à 30 $g.l^{-1}$ de MV, correspondant à une concentration en MES de l'ordre de 35-40 $g.l^{-1}$.

Une autre condition est de limiter les pertes calorifiques par évaporation liées à l'agitation du milieu par le système d'oxygénation et de brassage. De ce fait, on a cru d'abord que seul l'emploi de l'oxygène pur (avec sont haut rendement de dissolution et sa faible quantité de gaz perdu) permettait d'atteindre des températures suffisamment élevées.

La mise en couvre d'aérateurs immergés spécifiques (combinant souvent introduction d'air en fines bulles et brassage mécanique), présentant des rendements élevés de diffusion d'air, ainsi que, parfois, l'isolation et/ou la couverture du réacteur ont permis d'atteindre les températures propices aux organismes thermophiles tout en n'utilisant que de l'air pour l'oxygénation. Cette disposition est la plus fréquemment utilisée.

L'optimisation du volume d'un digesteur aérobie thermophile est difficile. Il faut en effet concilier les interactions suivantes, souvent antagonistes

- l'augmentation du volume du réacteur entraîne celle du temps de mise en contact, mais aussi les pertes calorifiques par rayonnement et par évaporation,
- une température élevée entraîne une cinétique de réaction plus rapide, mais contraint à une puissance d'aération plus forte pour tenir compte de la moindre solubilité de l'oxygène,
- une dépense d'énergie d'aération plus forte est favorable à l'oxygénation, mais peut causer des pertes calorifiques plus importantes.

Par ailleurs, les stabilisateurs aérobies supportent assez mal de fortes variations de charge ou, tout au moins, présentent des conditions de température très différentes suivant la charge. Dans le cas de stations à charge saisonnière très variable, ou devant fonctionner longtemps à charge réduite, il y a intérêt à prévoir plusieurs unités.

Une estimation rapide de la montée en température ?T du réacteur peut être faite à partir des relations

$$?T\ (°C) = 2{,}5.?DC0\ (g.l^{-1})$$

$$\text{ou } ?T\ (°C) = 3{,}5\ ?MO\ (g.l^{-1})$$

avec ?T = écart de température entre boues stabilisées et boues entrantes

?DCO = DCO éliminée dans le réacteur

?M0 = MO éliminée dans le réacteur.

Dans des climats tempérés, un temps de séjour de 4 à 6 jours peut permettre d'atteindre une température de l'ordre de 50 °C dans le réacteur et une élimination de 40 % des MO de boues présentant une concentration initiale en MS de 50 $g.l^{-1}$ (dont 35 $g.l^{-1}$ de MO). Plus le temps de séjour est court, plus les pertes calorifiques liées au départ de boues traitées deviennent prépondérantes, et cela d'autant que le climat est rigoureux et les boues brutes froides. Un réchauffage des boues brutes par les boues stabilisées dans un échangeur à contre-courant est cependant envisageable.

Dans les installations de digestion aérobie thermophile, des dispositions particulières doivent être prises pour maîtriser la production de mousses

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

et l'émanation occasionnelle d'odeurs désagréables.

Les écumes formées dans le réacteur sont extrêmement concentrées, du fait de la forte concentration en MS des boues du réacteur (jusqu'à 20 et 30 %) ; elles peuvent même parfois constituer, sur le niveau liquide, une couche flottante compacte présentant d'ailleurs un effet isolant favorable dans le cas de réacteurs ouverts. La production de mauvaises odeurs est liée à la température du réacteur (émission de vapeurs); ces odeurs sont aussi plus gênantes si l'introduction des boues brutes est mal répartie dans le temps; elles sont évidemment exacerbées si la capacité d'oxygénation est limitée. Des ouvrages fermés, équipés d'aérateurs largement dimensionnés, sont recommandés, mais le gain énergétique de la stabilisation aérobie thermophile est alors faible par rapport à la stabilisation aérobie conventionnelle.

Les boues qui sortent d'un digesteur aérobie thermophile fonctionnant à une température de 60 °C présentent des comptages bactériens très inférieurs à ceux d'un digesteur anaérobie mésophile. Les neufs d'Ascaris sont difficilement détectables et les virus sont normalement absents.

Du fait de cet intérêt particulier de la digestion aérobie thermophile sur le plan hygiénique, sa mise en oeuvre a été souvent envisagée essentiellement à des fins de pasteurisation (voir p. 945). Des essais prolongés ont montré qu'une chaîne "stabilisation aérobie thermophile de un à deux jours à 60 °C, suivie d'une digestion anaérobie mésophile dimensionnée pour 80 % de la quantité de MO contenues dans les boues brutes" permettait de disposer et de stocker, de la façon la plus sûre, des boues destinées à l'utilisation sur pâturages. En outre, cette chaîne permet normalement d'éviter un apport calorifique extérieur au système pour assurer la méthanisation des boues. Toutefois, l'installation de méthanisation doit comporter son équipement normal de réchauffage desboues (sécurité et période de démarrage). Un post-épaississement des boues est parfois constaté.

Le **compostage** (voir page 104) est également un procédé aérobie qui conduit à une montée en température de la boue, mais il est mis en oeuvre sur des produits solides et peut être appliqué sur des boues déshydratées. Il permet une stabilisation et une "hygiénisation" de la boue.

2.3. STABILISATION CHIMIQUE

La stabilisation des boues par voie biologique (anaérobie ou aérobie), nécessite des ouvrages importants. Lorsque la réduction du montant des investissements est un objectif prioritaire, le pouvoir fermentescible de la boue peut être diminué, au moins temporairement, par la seule adjonction d'agents chimiques utilisés à des doses bactériostatiques. Il s'ensuit une inactivation importante des germes pathogènes. Cette technique ne modifie donc pas la quantité de MO biodégradables contenues dans la boue; une reprise de fermentation est possible si l'évolution ultérieure des conditions du milieu le permet. La chaux, du fait de son coût réduit, de son alcalinité et de son effet favorable à un renforcement de la structure physique de la boue, est le réac

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tif le plus utilisé. L'apport de chaux peut être réalisé sur des boues liquides ou sur des boues déshydratées, et son effet diffère sensiblement suivant les conditions d'application.

Avec des **boues liquides**, deux cas sont à considérer:

- injection en amont d'un épaississeur de boues fraîches, afin de bloquer les fermentations dans celui-ci. Les doses de $Ca(OH)^2$ mises en oeuvre en sont de l'ordre de 15

par rapport aux MES de la boue,

- stabilisation de boues liquides avant utilisation en cultures. Une dose de $Ca(OH)_2$ de 10 % par rapport aux MES permet, sur de petits échantillons, après un mélange très intime, d'obtenir un pH supérieur à 12 après deux heures, et labattement des coliformes fécaux est alors de 10^4 à 10^6. Cependant, ce pH évolue très rapidement et, pour éviter une reprise importante des fermentations avant quinze jours, des doses supérieures à 30 % doivent être mises en oeuvre.

Le stockage de ces boues fraîches chaulées ne peut cependant être de longue durée. Rapidement, la recarbonatation et la très forte teneur en eau facilitent la reprise de la fermentation, que seule une nouvelle application de chaux permettrait de stopper.

Sur des boues **déshydratées**, la stabilisation à la chaux est plus durable et elle l'est d'autant plus que la teneur en eau est faible. Toutefois, le mélange chaux-boues, qui doit être intime, est moins aisé et nécessite des équipements de malaxage

plus puissants. L'emploi de chaux vive permet de profiter du caractère exothermique de la réaction d'hydratation de la chaux, du fait de la teneur en eau relativement faible de la boue; les effets en sont bénéfiques sur la réactivité de la chaux et sur le pouvoir désinfectant du procédé. Un abaissement de 10^6 à 10^7 des germes indicateurs est possible et on observe une quasi-disparition des salmonelles. Les doses de CaO sont de l'ordre de 30 à 40 % par rapport à la teneur en MS du gâteau.

Si la boue déshydratée présente une cohésion initiale suffisante (correspon**dant** approximativement à 25 % de MS sur des boues d'ERU), cette stabilisation chimique s'accompagne d'une "stabilisation" physique pouvant rendre le gâteau de boue plus apte à son utilisation comme matériau de remplissage ou de couverture.

Un stockage prolongé sur plusieurs mois de ces boues déshydratées chaulées est possible. Toutefois, cet apport massif de chaux n'est pas sans répercussion sur l'écoulement des boues en culture. Celuici peut être relativement aisé sur des terrains acides mais, souvent, les inconvénients suivants de la stabilisation chimique rendent difficile cette valorisation agricole

- évolution plus lente des MO dans le sol,
- complexation des éléments fertilisants, qui deviennent plus difficilement disponibles,
- perte d'azote due au chaulage.

2.4. PASTEURISATION

La pasteurisation n'est pas, à propre ment parler, un procédé de stabilisation

Elle a pour but d'obtenir une aseptisation de la boue. L'inactivation totale des agents pathogènes peut être recherchée,- par exemple, dans le cas d'épandage des. boues sur des pâtures en exploitation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Un critère de la pasteurisation est l'absence d'entéro-bactéries sur un échantillon de 10 grammes. Il est sûrement atteint si toutes les particules de la suspension boueuse sont maintenues à 70 °C pendant 30 min. Un défaut rencontré sur les installations de pasteurisation de boues est la recontamination du produit dans les canalisations et ouvrages situés à l'aval du pasteurisateur.

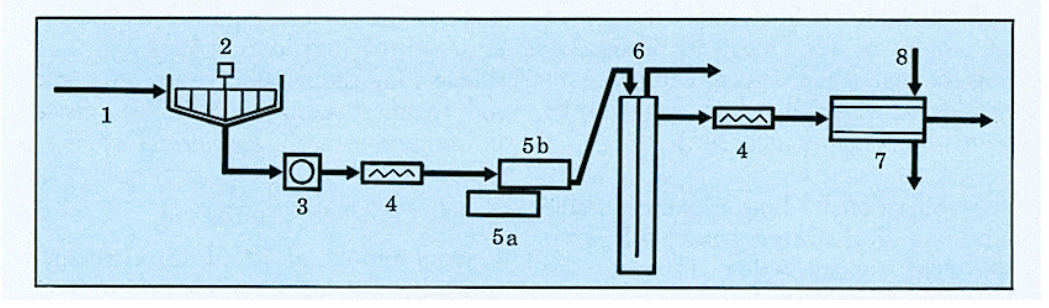
Pour cette raison, la disposition, un moment utilisée, prévoyant l'installation de pasteurisation à l'extrémité aval de la chaîne de traitement, après l'étape de stabilisation, est aujourd'hui déconseillée. On lui préfère la disposition inverse, avec le digesteur anaérobie alimenté à partir du pasteurisateur et jouant le rôle de stockeur de boues. Pareillement, les unités de

Pasteurisation à fonctionnement continu, et assurant un contrôle strict du parcours de la boue, sont préférées aux unités à fonctionnement alternatif par bâchées, dès que le débit à traiter est suffisant pour permettre l'adoption de cette technique.

La figure 605 donne un schéma simplifié d'un poste de pasteurisation en continu. Le refroidissement de la boue pasteurisée, au lieu d'être réalisé avec un circuit d'eau (perdue), peut être combiné avec le préchauffage de la boue brute dans un échangeur de chaleur à contre-courant, disposé avant le poste de pasteurisation proprement dit. Le bilan thermique est alors amélioré.

L'apport calorifique d'appoint peut être assuré par une chaudière autonome et un échangeur de chaleur eau boues ou, éventuellement, par un brûleur à gaz immergé dans la boue.

Un digesteur aérobie thermophile alimenté avec des boues pré-épaissies à des concentrations supérieures à 50 $g.l^{-1}$ en MS, peut jouer le rôle de pasteurisateur en amont d'un digesteur anaérobie (p. 942).



1 - Dégrillage. *4 - Pompe à boues.* *6 - Pasteurisateur.*
2 - Épaississeur. *5a - Chaudières.* *7 - Refroidisseur de boues.*
3 - Dilacérateur. *5b - Réchauffeur de boues.* *8 - Eau de refroidissement.*

Figure 605. Schéma simplifié d'un poste de pasteurisation à fonctionnement continu.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

19
TRAITEMENT DES BOUES

Les procédés de **déshydratation,** (mécaniques, parfois naturels), permettent de donner aux boues une consistance physique plus ou moins solide. La texture et le taux d'humidité du sédiment obtenu doivent répondre aux exigences de la destination finale choisie (voir page 918).

La majorité des boues organiques ou des boues minérales hydrophiles (boues d'hydroxydes par exemple) doivent subir un prétraitement spécifique, appelé **conditionnement**, pour permettre le bon fonctionnement des différents appareils de déshydratation mécanique.

Le degré de déshydratation dépend avant tout du type de boues à traiter (voir page 123) mais aussi du procédé de conditionnement, ainsi que des énergies mécaniques mises en oeuvre.

Les boues déshydratées peuvent ensuite subir différents traitements

- amélioration de la texture et réduction du taux d'hydratation du sédiment par ajout de charges diverses (chaux vive par exemple, ou sciure/copeaux de bois dans les procédés de compostage),
- **séchage** plus poussé, par des procédés thermiques, pour faciliter leur évacuation: agriculture, amendements organiques, et même incinération dans des fours d'ordures ménagères,
- et enfin**, incinération,** dans des fours adaptés, avec le souci d'une consommation d'énergie extérieure minimale. Il est donc nécessaire d'obtenir des sédiments de boues proches de l'autocombustibilité et d'améliorer les rendements thermiques des fours. Ceci conduit à une récupération maximale de l'enthalpie des fumées de combustion par échange thermique: réchauffage de l'air de combustion et production de vapeur ou d'eau chaude, et mise en place éventuelle d'un préséchage thermique des sédiments avant injection dans le four.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. CONDITIONNEMENT DES BOUES

Pour rendre exploitables les différents équipements de déshydratation, il faut procéder à la **floculation** de la boue pour "casser" la stabilité colloïdale etpour augmenter artificiellement la taille des particules. C'est le conditionnement, qui a recours à des procédés de nature physique (thermique principalement) mais plus souvent de nature chimique (ajout de réactifs minéraux ou de polymères de synthèse).

Parmi les différents procédés utilisés (figure 606), le conditionnement thermique est, de loin, le plus efficace pour diminuer l'hydrophilie particulaire. La floculation chimique, qui fait appel à des électrolytes minéraux (sels métalliques et chaux notamment), réduit également, mais dans une moindre mesure, le taux d'eau liée. La mise en oeuvre des polyélectrolytes ne provoque, quant à elle, aucune baisse de ce taux d'eau liée, et parfois même l'augmente. Le type de conditionnement utilisé va donc avoir une influence sur le taux d'hydratation du sédiment obtenu (voir analyse thermogravimétrique des boues, page 124).

Un conditionnement adéquat de la boue est la base du bon fonctionnement de l'atelier de déshydratation.

1.1. CONDITIONNEMENT CHIMIQUE

Chaque réactif chimique employé a son efficacité propre en ce qui concerne la dimension des flocs formés: grenus avec les réactifs minéraux et volumineux avec les polyélectrolytes.

1.1.1. Réactifs minéraux

Ils sont mieux adaptés à la déshydratation par filtres-presses ou filtres sous vide, appareils mettant en oeuvre une filtration en surface au travers d'un gâteau en formation, avec un support filtrant à mailles fines (généralement inférieures à 100-200 µm). Ces réactifs minéraux conduisent, en effet, à la formation de flocs fins mais mécaniquement stables.

De nombreux électrolytes minéraux à cation polyvalent pourraient être utilisés mais, pour des raisons d'économie et d'efficacité, on emploie le plus souvent des **sels métalliques,** tels que chlorure ferrique, chlorosulfate ferrique, sulfate ferrique, sulfate ferreux et, à un degré moindre, les sels d'aluminium.

Sur les boues organiques (traitements biologiques d'ERU et d'ERI), l'ion Fe" est de loin le plus efficace et le plus utilisé. Le choix entre $FeCl_3$ et $FeSO_4CI$ est généralement d'ordre économique.

L'action de ces électrolytes est double

- action coagulante: leur charge est souvent opposée à celle des particules boueuses, -action floculante: formation d'hydroxydes complexes hydratés, tels que $[Fe(H_20)_6, (OH)_3]_n$, qui jouent le rôle d'un polymère minéral.

Une introduction de **chaux**, consécutive à celle de l'électrolyte, est toujours d'un grand intérêt pour améliorer la filtrabilité

- pH > 10, ce qui correspond à un pH de floculation correct,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

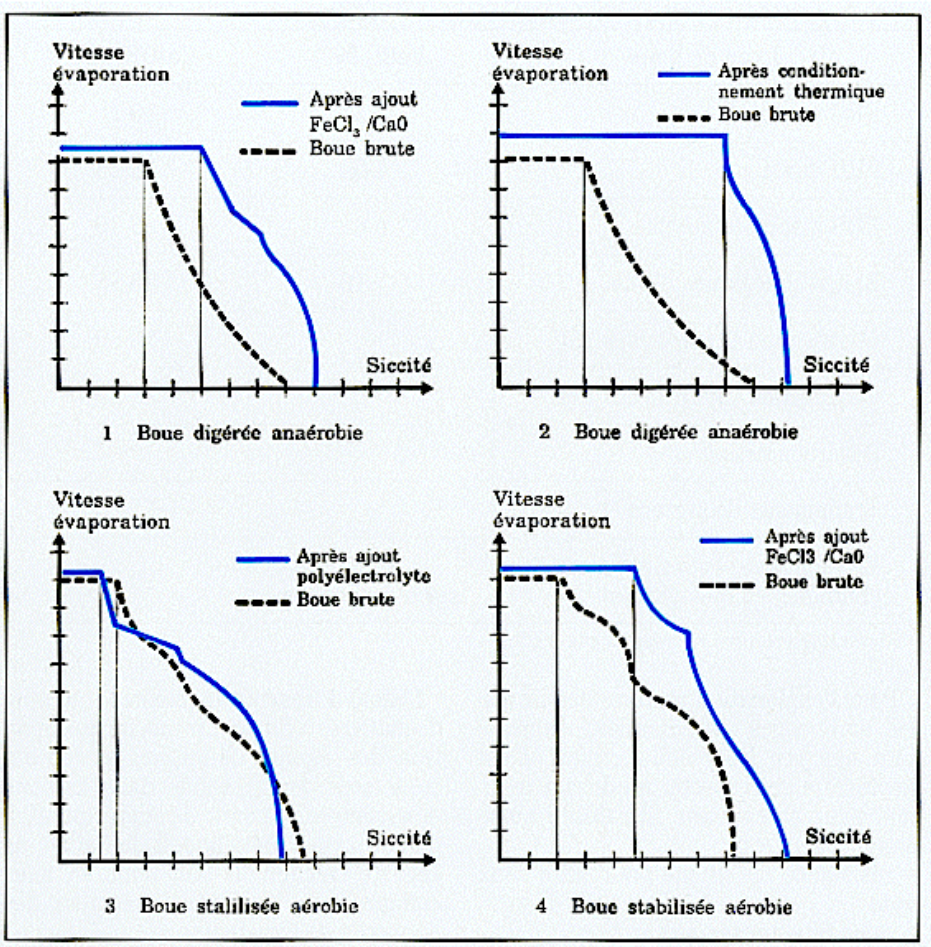


Figure 606. Influence du conditionnement sur la siccité des boues déshydratées (analyse thermogravimétrique).

- diminution du taux d'eau liée (obtention d'un gâteau plus sec et plus consistant),
- précipitation d'un certain nombre de sels de calcium (organiques et minéraux) favorables à la filtration,
- apport d'une charge minérale dense (déstabilisation de la structure colloïdale).

Avec les boues organiques, le double dosage sel de fer/chaux est d'ailleurs souvent obligatoire. Par contre, avec les boues d'hydroxydes hydrophiles, une simple addition de chaux suffit généralement à améliorer la filtrabilité de la boue.

Les doses de réactifs minéraux dépendent bien sûr de la nature des boues à filtrer, mais également de l'efficacité désirée. En première approche, avant filtre-presse, on peut les estimer comme suit

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Type de boue	$FeC1_3$ % *	$Ca(OH)_2$ % *
ERU primaire	2-3	10-15
ERU mixte	4-6	18-2 5
ERU stabilisée aérobie	6-8	25-30
Boues biologiques d'IAA	7-10	25-35
Clarification (hydroxydes Al)	-	30-50
Clarification (hydroxydes Fe)	-	2 5-3 5
Décarbonatation	-	-
Traitements de surface	-	15-25
ERI (mélange boues physico-chimiques et biologiques)	0-5 selon proportion	15-30

* Pourcentage exprimé par rapport aux MES.

Pour l'exploitation correcte des filtres, les surdosages sont inutiles, n'améliorant que peu les résultats, mais il est nécessaire de respecter un dosage minimal pour obtenir une **filtrabilité suffisante** (page 966)

- résistance spécifique pour filtre sous vide $r_{0,5} = 2$ à 5×10^{11} $m.kg^{-1}$,
- pour filtre-presse à chambre $r_{0,5} = 5$ à 15×10^{11} $m.kg^{-1}$.

Il est toujours recommandé de déterminer, dans chaque cas, par des essais simples de laboratoire (voir pages 372 et 375 – $r_{0,5}$ et test CST), les doses correctes nécessaires.

La présence, dans une boue, de fibres ou matières denses minérales, conduit généralement à des doses moindres de réactifs. Une forte proportion de matières organiques protidiques agit en sens inverse. L'ajout de réactifs augmente la quantité de matières à filtrer, car une forte proportion des agents chimiques introduits reste sous forme solide dans la boue déshydratée, par suite de la précipitation d'hydroxydes métalliques, de $CaCO_3$, de sels de calcium. Il faut donc en tenir compte pour le dimensionnement des appareils de filtration

- 60 à 70 % du poids de $FeCl_3$ introduit se retrouve dans le gâteau,
- 80 à 90 % du poids de $Ca(OH)_2$ introduit se retrouve aussi sous forme solide.

Corrélativement, une certaine partie des réactifs passe en solution sous forme de Cl^- ou de Ca^{++} et se retrouve dans le filtrat. **Mise en oeuvre des réactifs minéraux**

Un excellent mélange des réactifs avec la boue doit être recherché. Un apport d'eau de dilution (pour la solution concentrée de $FeC1_3$) et l'utilisation d'un lait de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

chaux à 50-80 $g.1^{-1}$, facilitent la diffusion des réactifs dans toute la masse.

La floculation des boues s'effectue dans des bacs agités en série (le premier pour le sel métallique, le deuxième pour la chaux - voir figure 607). Les temps de séjour sont de lordre de 5 à 10 minutes, ce qui est suffisant pour le grossissement du floc. L'énergie d'agitation est assez élevée (150-300 $W.m^{-3}$) mais non excessive.

Un temps supplémentaire de mûrissement du floc est souvent profitable, mais

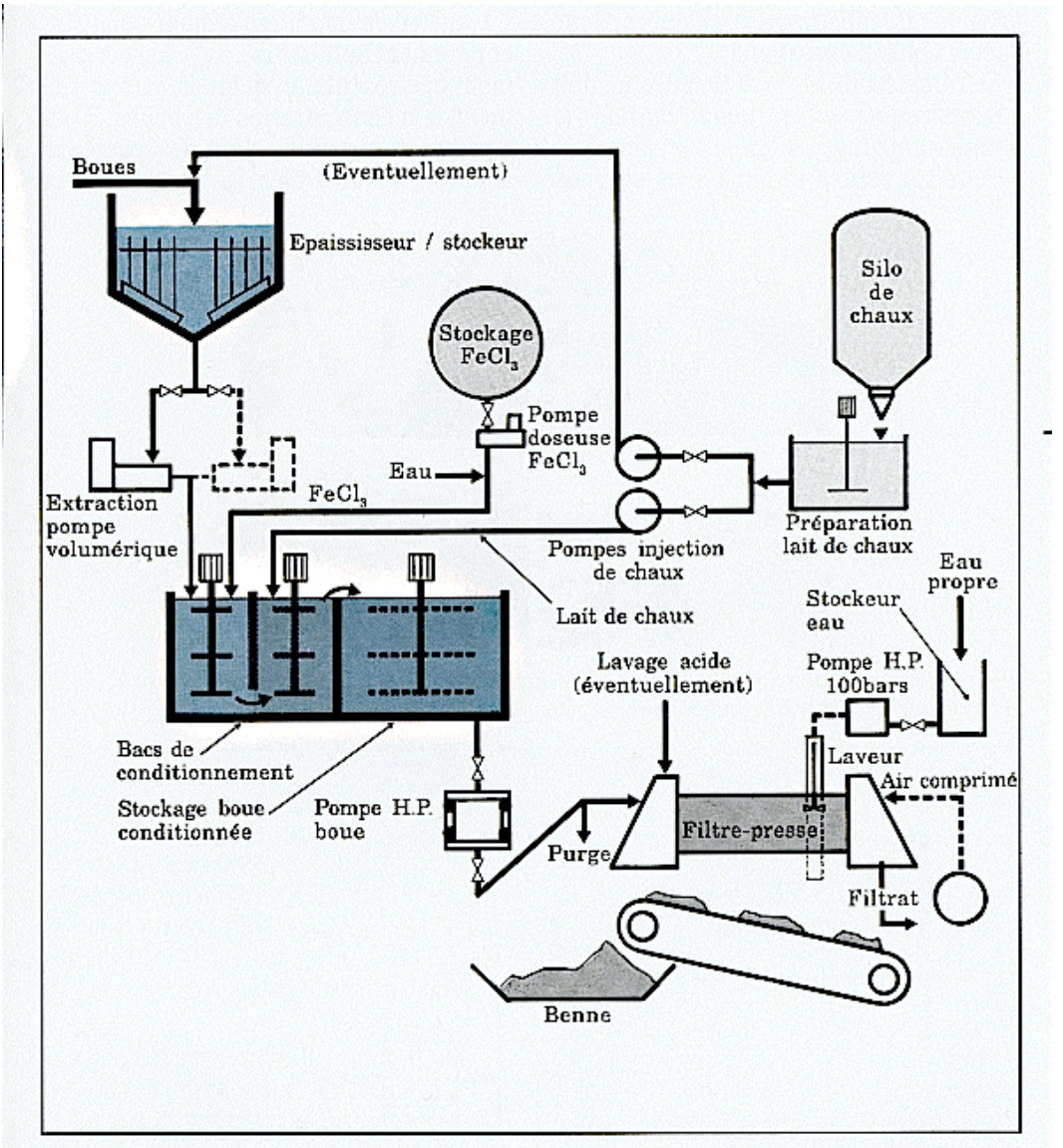


Figure 607. Schéma général de filtration sous pression : boues organiques hydrophiles.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

une agitation prolongée et trop forte peut, dans certains cas, détériorer la filtrabilité de la boue conditionnée. Un stockage prolongé de la boue conditionnée avant filtration (parfois utile pour les grosses stations) peut aussi avoir cet effet défavorable, en particulier sur des boues fraîches urbaines insuffisamment chaulées, donc susceptibles d'évolution.

Le transfert de la boue floculée ne doit pas provoquer la destruction du floc: la pompe centrifuge est ainsi à éviter.

Pour les petites et moyennes stations d'épuration et sur certaines qualités de boues, il est possible de réaliser la floculation en ligne avec des dispositifs de mélange rapide très bien étudiés. La mise en oeuvre du conditionnement (figure 609) est simplifiée, mais les doses un peu plus élevées.

L'atelier de conditionnement peut être entièrement automatisé, avec asservissement des réactifs au débit et, éventuellement, à la concentration des boues. Il est également possible, avec des capteurs adaptés, de contrôler la filtrabilité des

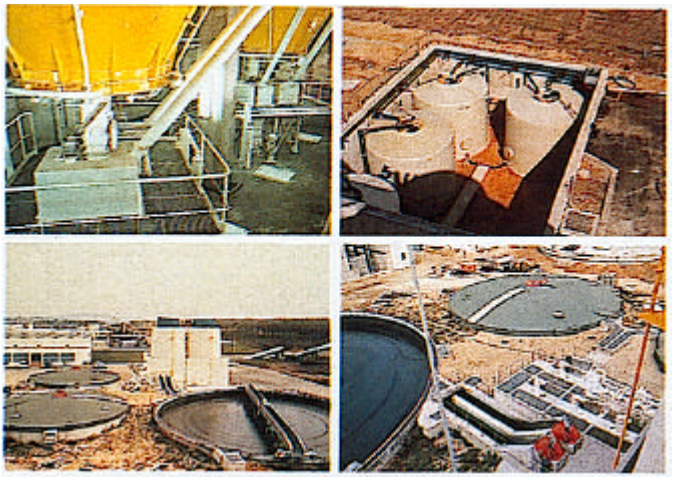


Figure 608. Installation d'ACHÈRES IV (Yvelines) pour le S.I.A.P.P. Capacité: 300 t.j^{-1} matières sèches. Poste de conditionnement chimique des boues.

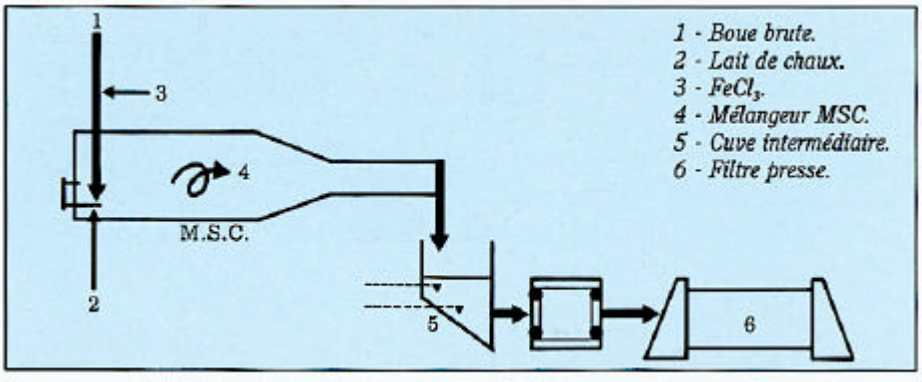


Figure 609. Conditionnement simplifié avec MSC pour petits traitements de boues organiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

boues (capteur de capillarité automatisé) ainsi que la densité du lait de chaux (capteur photométrique par exemple).

1.1.2. Polyélectrolytes

Les polymères naturels (amidon, polysaccharides, alginates, etc.) n'ont toujours eu que peu d'application en conditionnement des boues, du fait de la floculation médiocre obtenue. Les polyélectrolytes sont beaucoup plus efficaces, formant des flocs volumineux (plusieurs millimètres), bien différenciés dans une eau interstitielle clarifiée.

Les polyélectrolytes ont pour effet

- une floculation extrêmement marquée, par formation de ponts entre particules, grâce aux longues chaînes ramifiées. Cette floculation est renforcée par une action coagulante dans le cas de polymères cationiques (voir figure 611).
- une très forte diminution de la résistance spécifique de la boue, l'eau libre interstitielle libérée étant très rapidement drainable. Par contre, les flocs, souvent spongieux et assez hydrophiles, entraînent dans la plupart des cas une augmentation du facteur de compressibilité de la boue.

La structure du floc ainsi obtenu a rendu possible

- le développement de filtres équipés de support filtrant à larges mailles (0 ,4 à 1 mm) donc moins colmatable : c'est le cas des filtres à bandes presseuses de type SUPERPRESSDEG, spécifiquement étudiés pour la déshydratation des boues,
- le développement d'appareils de drainage pour épaissir rapidement et efficacement les boues: GDE, tambours filtrants, tables d'égouttage de type T-DEG,
- l'amélioration très sensible des performances des décanteuses continues (débit, mais surtout clarification) par augmentation très nette de la densité des particules rassemblées.

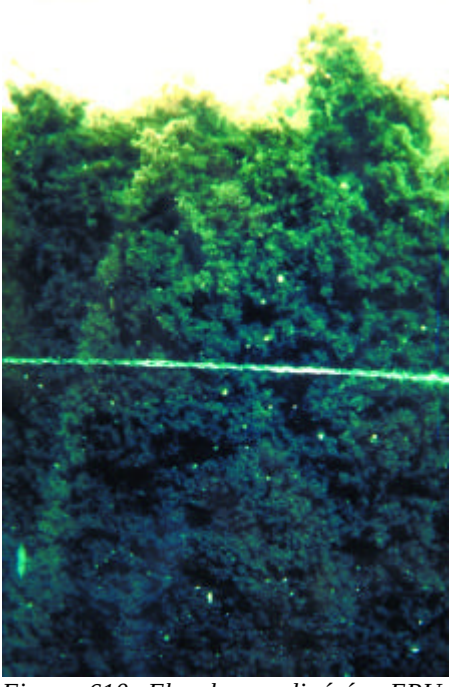


Figure 610. Floc boues digérées ERU (avec Polyélectrolytes). Échelle 1.

Un nombre important de polyélectrolytes est à disposition, et il faut généralement faire appel à des tests simples de floculation, de drainage et de pressage, pour choisir le produit le mieux adapté; ces tests permettent - de choisir le polymère le plus économique, -de trouver le floc le plus différencié, - de juger de la résistance mécanique du floc (important pour la centrifugation), - d'apprécier la bonne drainabilité de la boue floculée (importante pour les filtres à bandes et les appareils de drainage), - de tester la compression du floc drainé estimation de l'aptitude ou non au fluage

sous l'effet de la pression, et de l'adhésion du floc pressé à la toile de filtration.

Le choix définitif du produit ne s'effectue généralement qu'après tests de laboratoire, puis tests industriels, avec les produits présélectionnés.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

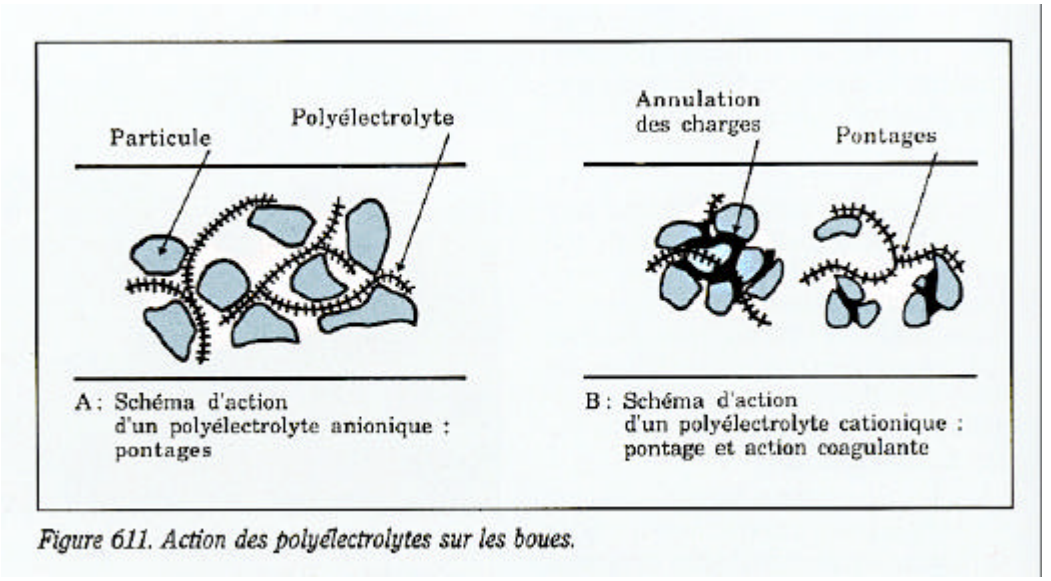


Figure 611. Action des polyélectrolytes sur les boues.

Les polyélectrolytes **cationiques** sont surtout efficaces pour le conditionnement de boues à teneur élevée en matières organiques colloïdales (MO/MES supérieur à 40 % généralement) ou à teneur élevée en fibres cellulosiques.

Type de boue	**Polyélectrolyte cationique anhydre kg/tonne MES**
ERU primaire	1 à 3
ERU mixte fraîche	3 à 5
ERU mixte digérée	4 à 6
ERU aération prolongée	4 à 8
ERI biologique IAA	5 à 9
ERI fibreuse de papeterie	2 à 6

Les polyélectrolytes de masse molaire moyenne sont plus adaptés au filtre à bandes presseuses (drainage facilité). Ceux de très haute masse molaire, conduisant à des flocs très volumineux, denses et de forte résistance, conviennent mieux à la centrifugation.

Les **polyélectrolytes anioniques** trouvent une large application dans les suspensions boueuses à caractère minéral prépondérant (boues denses hydrophobes, boues d'hydroxydes métalliques). Les doses employées avec ces polymères sont souvent plus modestes de l'ordre de 0,3 à 2 kg/tonne MES.

Pour un mélange de boues organiques (biologiques par exemple) et de boues minérales (hydroxydes par exemple), l'ionicité du polyélectrolyte peut varier en fonction du rapport de coprésence. L'association de deux polyélectrolytes, anionique et cationique (injectés séparément), permet, sur certaines boues, de réduire le coût global du conditionnement ou d'obtenir une floculation plus efficace.

Pour certaines applications (déshydratation sur filtre-presse par exemple), le polyélectrolyte peut être associé à un sel métallique: précoagulation au sel ferrique et, ensuite, constitution d'un floc moins hydrophile à l'aide du polyélectrolyte.

- **Mise en oeuvre des polyélectrolytes**

En traitement des boues, les polyélectrolytes utilisés sont souvent livrés en poudre, notamment dans les moyennes ou grandes stations d'épuration. Pour des

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 612. Installation de LISBONNE (Portugal). Préparation semi-automatique de polyélectrolyte pour filtre à bandes.

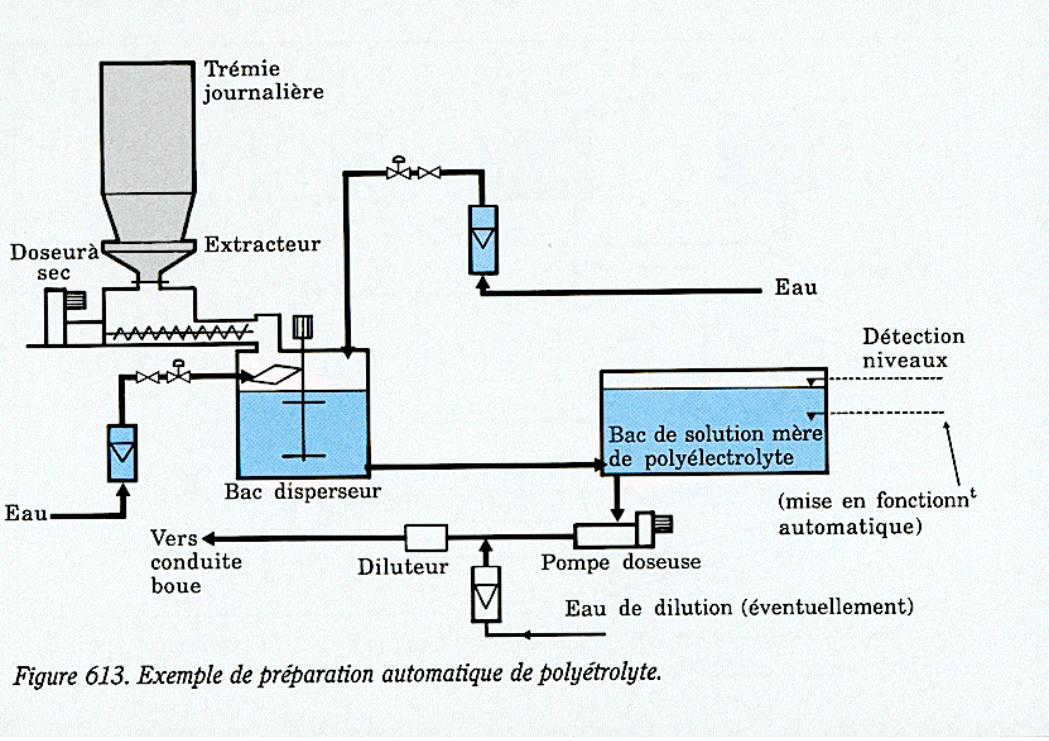


Figure 613. Exemple de préparation automatique de polyétrolyte.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

installations plus petites, il y a possibilité d'utiliser des polyélectrolytes en sirop visqueux, plus faciles à mettre en oeuvre. La gamme des polyélectrolytes en poudre est très étendue, ce qui est un avantage important, du fait de la diversité de qualité des boues. Au chapitre 20, § 6.1., les postes de préparation et distribution sont présentés.

La solution mère (4 à 6 $g.l^{-1}$) est généralement diluée avant introduction dans la boue mais il n'y a pas de règle précise

tout dépend des viscosités respectives de la boue, et de la solution de polyélectrolyte. Le mélange boue-polyélectxolyte s'effectue de façon très simple, la floculation étant quasi immédiate, mais les flocs formés sont souvent fragiles

- pour une décanteuse continue, injection

du polyélectrolyte directement dans la

conduite de boue, juste à l'entrée de l'appareil, sans utilisation de floculateur. L'énergie engendrée dans la centrifugeuse suffit, - pour un filtre à bandes presseuses, injection du polyélectrolyte dans une petite cuve agitée, placée juste en amont de la zone de drainage de l'appareil. Le temps de floculation est très court, généralement inférieur à la minute,

- pour la GDE et les filtres à bandes simplifiés, la floculation peut se faire par injection du polyélectrolyte en conduite au travers d'un mélangeur statique de type MSC,

- pour un filtre-presse, les modalités d'injection sont plus complexes. Le débit d'un filtre-presse n'étant pas constant au fur et à mesure du cycle, deux modes opératoires sont possibles

- floculation dans un bac avant pompage, puis envoi de la boue floculée dans le filtre: cette façon de procéder conduit assez souvent à des échecs (sauf sur des boues à tendance fibreuse) car le floc se détruit en partie pendant le pompage,

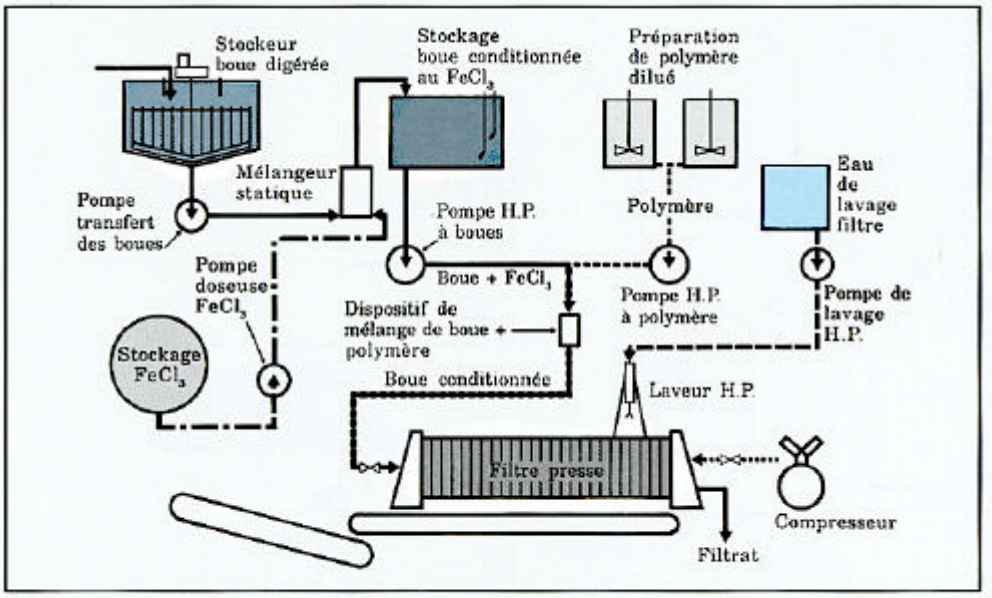


Figure 614. Installation de TOURS (Indre-et-Loire). Schéma du poste de traitement de boues avec filtre-presse et conditionnement par polyélectrolyte.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- floculation après la pompe d'alimentation du filtre (voir figure 614)

dans ce cas, il faut réaliser la proportionalité du débit de polymère au débit très variable de boue, ce qui implique l'emploi de deux pompes HP de mêmes caractéristiques (ou d'une pompe doseuse attelée à la pompe à boue).

Cette manière d'opérer permet de ne pas détruire le floc avant l'entrée du filtre. L'injection du polyélectolyte est alors effectuée en conduite sous pression, au travers d'un système de mélange adapté. Ce procédé est certainement le plus sûr mais n'est pas sans sujétion d'exploitation, car les gâteaux obtenus peuvent être trop collants et assez difficiles à débâtir. De plus, des variations importantes de concentration des boues sont gênantes: possibilité, dans ce cas, d'utiliser des capteurs de mesure de flux massique, avec les difficultés inhérentes aux capteurs mesurant de fortes teneurs en MES.

La fiabilité de l'utilisation des polyélectrolytes en filtre-presse exige donc presque toujours un test industriel de confirmation. La caractéristique principale d'un floc obtenu par ajout de polyélectrolyte est sa fragilité, parfois très grande: dans la mise en oeuvre de tout procédé de déshydratation employant ce réactif, il faut donc éviter des cuves à agitation trop violente, des temps de floculation trop longs, des pompages destructeurs de la boue préalablement floculée : c'est pour cela que les points d'injection sont à l'amont presque immédiat du système d'essorage, avec un mélange efficace mais bref

.

1.2. CONDITIONNEMENT THERMIQUE

Les liaisons de l'eau et de la matière colloïdale peuvent également être rompues par voie thermique, notamment par montée en température des boues. Cette idée, de traiter les boues par cuisson pour les rendre filtrables, date du début du siècle, mais la fiabilité industrielle du procédé a été véritablement démontrée vers le milieu des années 70 ; différentes variantes technologiques d'apport calorifique ont ensuite été développées.

La montée à une température suffisante d'une boue, conduit à une transformation irréversible de sa structure physique, surtout si elle contient une forte proportion de matières organiques et colloïdales.

La température de cuisson adoptée varie entre 150 et 200 °C et le temps de cuisson entre 30 et 60 minutes, suivant le type de boue et la filtrabilité désirée.

Durant la cuisson, les gels colloïdaux sont détruits et l'hydrophilie particulaire régresse fortement La densité des particules est nettement accrue. On assiste également à deux phénomènes simultanés

- solubilisation de certaines MES (hydrolyse de l'amidon notamment, avec formation de sucres), ammonisation d'azote organique,
- précipitation de quelques matières en solution.

La cellulose est peu dégradée et les graisses demeurent relativement stables.

Selon le type de boue, la cuisson solubilise 20 à 40 % des MO et conduit donc à la production de liqueurs interstitielles pré

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

sentant des DBO_5 de l'ordre de 3 000 à 6000 $mg.l^{-1}$ (rapport DCO/DBO_5 de l'ordre de 2,5). Les valeurs les plus fortes sont obtenues avec la cuisson des boues fraîches. Cette solubilisation croît avec la température et avec le temps de cuisson.

L'azote est présent dans la phase liquide à des taux relativement élevés (0,5 à 1,5 $g.l^{-1}$ en NH_4^+), mais le phosphore, ainsi que les métaux, restent précipités dans les boues.

1.2.1. Avantages du conditionnement thermique

Le choix d'un tel conditionnement, d'investissement plus élevé, s'explique par

- **universalité d'application** sur toutes les boues à prédominance organique,
- **stabilité** des performances, quelles que soient la qualité et la concentration des boues. Le seul réglage de la température de cuisson suffit,
- **épaississement important** et rapide après cuisson: obtention de boues décantées à plus de 120 g $MES.l^{-1}$ voire 200 $g.l^{-1}$,
- amélioration de la structure de la boue telle qu'une **filtration sans apport de réactifs** (filtre-presse ou filtre sous vide) est toujours possible. L'influence de la température est prépondérante pour la filtrabilité, car le temps de cuisson adopté dans les installations industrielles, généralement supérieur à la demi-heure, est suffisant (figure 615).

La température doit être assez élevée pour donner une bonne filtration, mais pas trop, pour éviter des surconsommations d'énergie, des concentrations de boues épaissies trop fortes, des "jus" (surverse épaississeur boue cuite et filtrats) trop chargés en DCO,

- **très forte** siccité des gâteaux de filtrepresse (généralement plus de 50 % MS, largement supérieure à celle obtenue avec un conditionnement chimique), - production de boues déshydratées, stérilisées, n'ayant reçu aucun apport de réactifs, et qui peuvent être aisément réintroduites dans les sols,
- réutilisation optimale du biogaz ; l'association d'une digestion anaérobie et d'un conditionnement thermique est l'une des filières les plus séduisantes. Elle permet de gérer au mieux les productions et consommations d'énergie.

1.2.2. Sujétions d'emploi

L'efficacité du conditionnement thermique s'accompagne des sujétions suivantes

- **Recyclage des "jus" en tête de station** La pollution organique liée à ces jus est aisément biodégradable, et sa répercussion sur la bonne marche de l'installation de traitement d'eau est d'autant plus réduite que le recyclage est réalisé de façon continue. Ceci peut être obtenu dans les grandes stations d'épuration. La surcharge en DBO_5 est de l'ordre de 10 à 25 % (pollution en grande partie soluble et riche en azote). Il faut donc en tenir compte dans le dimensionnement des bassins d'aération.

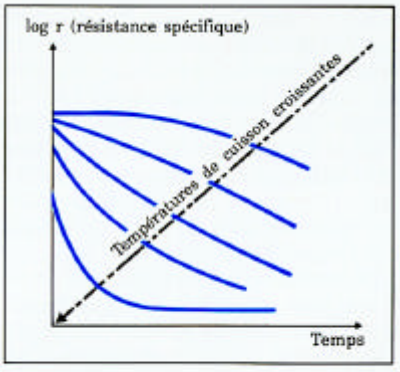


Figure 615. Influence relative du temps et de la température de cuisson sur la filtration des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Un traitement séparé, par voie anaérobie, de ces effluents concentrés, permet une réduction de la DCO, liée à la charge polluante recyclée, de l'ordre de 55 à 70 % avec une production de biogaz réutilisable (environ 0,4 Nm^3/kg DCO détruite).

Les digesteurs de type "contact" (2 à 3 kg DCO/m^3.j) ou "à lit de boue" (3 à 6 kg DCO/m^3.j) sont les plus utilisés, mais des réacteurs à cultures fixées sont également possibles.

- **Production d'odeurs**

Les mesures de prévention les plus appropriées sont les suivantes: couverture des épaississeurs et stockeurs, refroidissement final des boues cuites (notamment par préchauffage simultané des boues à digérer ou en cours de digestion), limitation, voire suppression, des purges des réacteurs de cuisson. Les contraintes locales imposent souvent la désodorisation de l'air aspiré dans les principales enceintes: cuisson - épaississement - déshydratation.

- **Nécessité d'un nettoyage périodique des surfaces d'échange**

(Interdisant, en particulier, la mise en oeuvre du procédé sur des boues d'ERI trop riches en calcium).

- **Investissement relativement coûteux**

Circuit chauds, sous pression de 15 à 25 bars.

1.2.3. Mise en œuvre de la cuisson des boues

La figure 616 donne les schémas de fonctionnement les plus souvent mis en oeuvre. Dans tous les cas, on cherche à récupérer le maximum de calories en provenance des boues cuites pour préchauffer les boues à cuire, de sorte que l'apport extérieur de calories ne corresponde qu'à un réchauffement complémentaire de 25-40 °C. Cette récupération est réalisée dans des échangeurs tubulaires à contre-courant On a toujours intérêt à disposer d'un réacteur séparé assurant un temps minimal de cuisson à une température contrôlable.

L'apport de calories se fait

- soit par injection directe de vapeur vive dans le réacteur (système COTHERMA avec un échangeur "boue/boue" ou système COTHERMA-B avec deux échangeurs "boue/eau"),
- soit par échange indirect de chaleur avec un fluide caloporteur non vaporisable, de l'huile par exemple: c'est le système COTHERMOL. Un éventuel appoint de vapeur vive dans le réacteur permet d'espacer les détartrages des échangeurs.

Les solutions avec injection de vapeur vive dans le réacteur ne sont pas les plus économiques en énergie mais elles présentent l'avantage de pouvoir assurer la température de cuisson quel que soit l'encrassement des échangeurs-réchauffeurs tubulaires.

Avec l'échange indirect par fluide caloporteur, des précautions supplémentaires sont à prendre s'il n'y a pas de secours prévu par injection de vapeur vive: surélévation possible de la température du fluide caloporteur par rapport aux conditions normales de fonctionnement, moyens de nettoyage aisé et rapide des tubes intérieurs.

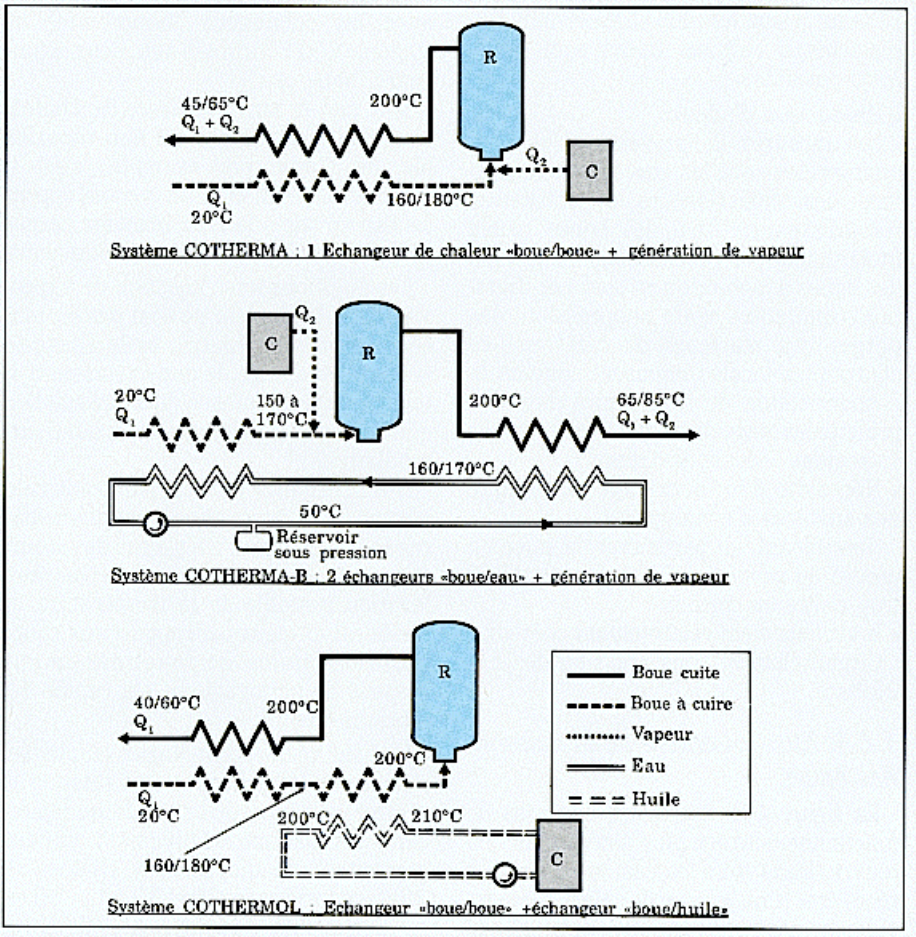
La fiabilité des technologies employées repose sur les principes suivants

- mise en œuvre de ce conditionnement dans des stations relativement grandes, permettant de disposer de chaînes de débit compris entre 20 et 50 $m^3.h^{-1}$. Il est alors possible d'assurer une décharge continue des boues, évitant les cavitations destructrices, et de construire des échangeurs à grande section de passage spécia-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

lement profilés (nettoyage possible par tuyère à eau sous 100 bars, ne demandant qu'un arrêt de quelques jours),

- utilisation préférentielle sur les boues digérées, permettant l'emploi d'échangeurs "boue/boue" sans difficulté. Dans le cas de boues contenant une certaine proportion de matières hétérogènes, non ou mal stabilisées, il est préférable de réaliser les récupérations de calories des boues cuites à l'aide d'un fluide intermédiaire (l'eau par exemple) et aussi de dessabler les boues pour éviter des usures prématurées, voire d'utiliser l'acier inox pour prévenir certaines corrosions.



Q_1 = débit de boues. *R = réacteur.*
Q_2 = débit de vapeur. *C = chaudière.*

Figure 616. Circuits types de conditionnement thermique des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

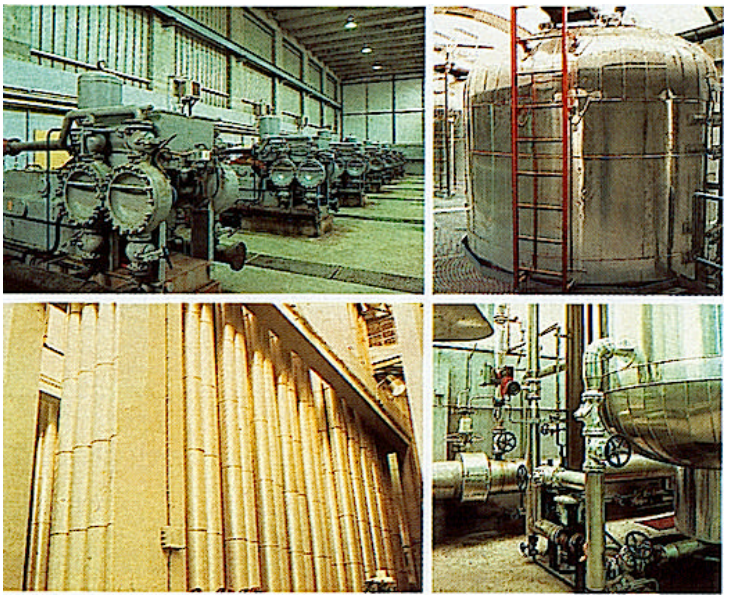


Figure 617. Installation d'ACHÈRES IV (Yvelines) pour le S.I.A.P.P. Conditionnement thermique des boues digérées avec 7 chaînes de débit unitaire 40 $m^3.h^{-1}$.

La dépense calorifique brute (combustible) nécessaire varie suivant les schémas et l'état d'entartrage des échangeurs. Avec une exploitation suivie et une surface d'échange suffisante, les consommations énergétiques sont comprises dans les limites suivantes

- injection directe de vapeur vive: 50 à 80 $th.m^{-3}$ de boue,
- apport indirect par fluide caloporteur 35 à 60 $th.m^{-3}$ de boue.

REMARQUE: La récupération calorifique est aussi envisageable par détentes en cascade de la boue cuite. Cette solution, qui évite les échangeurs tubulaires, impose, par contre, les pompages successifs, sous forte pression et haute température, de la boue à conditionner.

1.2.4. Combustion humide des boues

A son origine, ce procédé consistait à chauffer la boue en présence d'air, sous de très fortes pressions (jusqu'à 200 bars et plus) dans le but de réaliser une oxydation poussée de la matière organique, simultanément à la transformation physique de la matière colloïdale. La technologie mise en oeuvre était très lourde.

Une alternative à ce procédé utilise la technique du **puits profond,** selon les méthodes de forage pétrolier (profondeur 1500 m).

La seule énergie de pompage nécessaire correspond à la perte de charge dans le puits. Les fortes températures atteintes sont dues aux températures des grandes profondeurs et au caractère exothermique de la réaction. L'injection d'oxygène est préférée à l'air.

Les résultats suivants sont annoncés sur des boues biologiques d'ERU oxydées:

- réduction des MES: 70 à 80
- réduction des MV : > à 95 %
- réduction de DCO : 75 à 80 %

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Du puits profond sont extraits

- des gaz (CO_2 surtout et quelques hydrocarbures),
- une boue oxydée, dont les MES sont facilement filtrées ou centrifugées (siccité du résidu de 40 à 70 %). Le "jus" clarifié peut être traité par méthanisation.

Ce procédé intéressant d'oxydation poussée de la MO en milieu liquide n'a, cependant, eu, à ce jour, que très peu d'applications industrielles (petits débits, coût du forage, corrosions du fond de puits inévitables). Néanmoins, il peut s'avérer attractif pour traiter de petites quantités d'ERI très concentrées en pollution organique.

1.3. CONDITIONNEMENTS DIVERS

Il existe d'autres procédés de conditionnement, dont les applications sont rares, soit en raison de leurs coûts d'investissement ou d'exploitation, soit du fait de leur efficacité faible ou aléatoire.

1.3.1. Congélation

La solidification totale de la boue par congélation, pendant un temps suffisant, permet de réduire très efficacement la quantité d'eau liée à la matière, et par là-même de regrouper les particules. Ce regroupement demeure stable après fusion de la glace, et la filtrabilité de la boue est alors nettement améliorée. La congélation s'effectue à des températures de l'ordre de - 10 à - 2 0 °C, et pendant une durée de 1 à 4 h.

Jusqu'à présent, la congélation-décongélation (système fréon-glycol le plus connu) a été appliquée principalement aux boues à prédominance minérale, difficiles à déshydrater: cas notamment des boues d'hydroxydes d'aluminium provenant de la production d'EP ou de la préparation d'El. Ce conditionnement, qui reste coûteux en énergie, est souvent associé à une filtration sous vide très performante (siccité supérieure à 30 %).

1.3.2. Conditionnement par charges

L'apport de matières sèches, généralement inertes, améliore la cohésion de la boue, disperse le milieu colloïdal et, par là même, agit favorablement sur la filtrabilité. Le facteur s de compressibilité est, en même temps, nettement amélioré.

En conditionnement de boues liquides, cet ajout minéral ($CaC0_3$, gypse, cendres volantes, charbon, etc.) permet de diminuer les doses des réactifs habituellement utilisées mais non de les supprimer. L'effet essentiel recherché est l'amélioration de la texture du gâteau, soit pour en faciliter la manutention, soit pour permettre une exploitation correcte des appareils de déshydratation: par exemple, addition de carbonates à des boues biologiques, ou ajout de sciure ou matières fibreuses à des boues huileuses avant filtre à bandes.

Il est aussi toujours intéressant de combiner la déshydratation de boues difficiles (hydroxydes, biologiques) avec des boues minérales denses (décarbonatation, lavage de gaz, sulfate de calcium, boues de papeterie, etc).

Les apports de charges, pour être efficaces, sont en général de l'ordre de 20 à 40 % des MES initiales de la boue.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'ajout de charges sur des gâteaux prédéshydratés peut avoir aussi pour but

- l'augmentation de la siccité avant décharge ou valorisation (ajout CaO ou sciure par exemple),
- la réduction du facteur de compressibilité de la boue avant un deuxième étage de déshydratation: ajout de cendres volantes par exemple, sur un gâteau de filtre à bandes, avant passage dans un filtre à très haute pression (10 voire 40 bars).

1.3.3. Conditionnement

électro-acoustique

Il constitue plus une amélioration du conditionnement chimique qu'un procédé de conditionnement en lui-même.

Ce procédé assure une synergie entre

- une électro-osmose, qui conduit l'eau en dehors des capillaires vers la surface, - et des ultra-sons, qui orientent les particules dans leur position la plus stable, facilitant ainsi le drainage à travers le gâteau.

Ce conditionnement pourrait être adapté à la déshydratation sur filtrepresse et filtre à bandes. En laboratoire, les gains en siccité dépassent 10 points, mais ce procédé est certainement d'une mise en oeuvre onéreuse à l'échelle industrielle.

1.3.4. Conditionnement par solvants ou huiles

Le mélange de la boue à des solvants ou à des huiles, permet, dans certaines conditions de température, de séparer plus facilement, par voie mécanique, les matières sèches, tout en ayant la possibilité de récupérer une bonne partie du solvant. La fiabilité du procédé n'a pas été confirmée.

Certains autres produits chimiques peuvent, en principe, améliorer le degré de déshydratation: formol, glyoxal, amines hydrophobes, etc. mais, en réalité, le gain en siccité est très aléatoire et les coûts d'utilisation sont élevés.

1.3.5. Agents de solidification

Les traitements utilisant ces réactifs ne sont pas, à proprement parler, des procédés de conditionnement: ils sont appliqués aux boues liquides, mais ne sont pas suivis d'une déshydratation mécanique.

Divers réactifs sont utilisés, seuls ou en combinaison: ciment Portland, ciment au laitier, silicate de soude, plâtre, cendres volantes, laitiers, résines organiques... Ils provoquent la prise en masse (solidification) de la boue liquide à traiter.

Suivant les dosages mis en oeuvre, un état pâteux, pelletable, ou parfaitement solide, peut être obtenu. La mise en décharge est facilitée et la plupart des métaux peuvent être fixés chimiquement. Mais les contraintes sont grandes: pas de diminution du volume liquide des boues, dosages importants (15 à 35 % du poids de boue liquide), stabilité à long terme incertaine.

De ce fait, ces procédés coûteux ne sont utilisés que dans des centres, spécialisés, de traitement de boues toxiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. DÉSHYDRATATION DES BOUES PAR FILTRATION

2.1. CARACTÉRISATION NUMÉRIQUE DE LA FILTRABILITÉ

(voir page 178 et page 372)

L'essorage des boues par filtration est le mode de déshydratation le plus utilisé dans le traitement de boues provenant de l'épuration de l'eau. Cette filtration peut consister en un simple drainage sur lit de sable, ou en une filtration dite "mécanique", sous vide ou, sous moyenne ou forte pression, faisant appel à des matériels plus ou moins élaborés.

Malgré la diversité et la complexité du mélange que constituent généralement les suspensions boueuses, leur filtrabilité peut être caractérisée numériquement

2.1.1. Résistance spécifique à la filtration r

C'est la résistance qu'oppose à la filtration *(ou* cheminement du filtrat) une quantité de gâteau déposée sur 1 m^2 de surface filtrante et contenant 1 kg de produit sec.

A partir des lois générales de la filtration en surface, plusieurs hypothèses sont adoptées:

- résistance négligeable du support filtrant (Rm) par rapport à la résistance spécifique r du gâteau (sauf en cas de colmatage ou de mailles vraiment serrées),
- remplacement de W, masse de MES déposée par unité de volume de filtrat par C, concentration en MES du liquide boueux (sauf pour les suspensions très denses).

La formule simplifiée de r s'établit ainsi

$$r = \frac{2a\ PS^2}{\eta\ C} \text{ en } m.kg^{-1}$$

avec:

P : Pression de filtration

? : Viscosité dynamique du filtrat

S : Surface filtrante

a : Pente de la droite obtenue dans l'essai de filtrabilité

Il est d'usage d'établir les comparaisons entre différentes boues à partir de $r_{0,5}$ (coefficient de filtration sous une pression différentielle de 0,5 bar ou 49 kPa). Pour une boue mixte digérée d'ERU, les valeurs de $r_{0,5}$ se situent généralement aux environs de 10^{14} à 10^{15} $m.kg^{-1}$, valeurs incompatibles avec un passage direct sur filtre mécanique, d'où l'emploi obligé, dans ce cas, d'agents de conditionnement améliorant la filtrabilité. Pour des boues de décarbonatation, beaucoup plus hydrophobes, les valeurs initiales de $r_{0,5}$ sont très basses (de l'ordre de 1 à 5 x 10^{11} $m.kg^{-1}$) et aucun adjuvant n'est alors requis.

2.1.2. Facteur de compressibilité de la boue

Lors d'un accroissement de la pression différentielle, il se produit un resserrement des pores du gâteau, conduisant à une résistance accrue à la filtration

$$r = 2^S\ r_{0,5}\ P^S = r'P^S$$

La valeur de s, définie graphiquement par la pente de la droite

$$\log \frac{r}{r'} = s \log P \text{ (voir figure 618),}$$

intervient sur le débit de filtration

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

s < 1: le débit de filtration augmente avec P croissant,

s > 1: le débit de filtration diminue avec P croissant.

Les substances cristallines insolubles, ou celles qui leur sont morphologiquement comparables (boues d'oxydes de fer, de lavage de gaz ou de carbonates...), sont généralement peu compressibles (s < 0,6) : l'application de pressions fortes sera donc profitable. Pour des boues plus compressibles (s entre 0,6 et 1), comme le sont beaucoup de boues conditionnées avec-réactifs minéraux ou par voie thermique, l'intérêt de fortes pressions (10-15 bars) subsiste, mais lorsque s approche de l'unité (boues d'hydroxydes chaulées ou boues organiques urbaines insuffisamment conditionnées par sel ferrique et chaux), il est parfois possible de se contenter de pressions moyennes (7-10 bars), car dans ce cas, le gain minime de siccité à de plus fortes pressions n'est obtenu qu'aux dépens de longs temps de filtration.

Lorsque s dépasse 1 (boues organiques fortement protidiques avec polyélectrolytes par exmple), l'application de fortes pressions est souvent inutile (voir figure 619) car elle n'a que peu d'influence sur la siccité finale du gâteau de déshydratation.

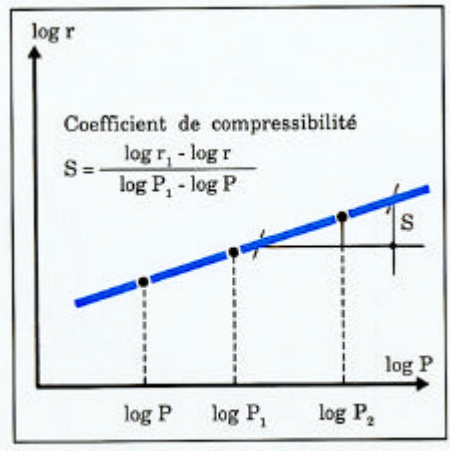


Figure 618. Détermination du coefficient de compressibilité.

La montée progressive en pression (donc la consolidation lente du gâteau de filtration) présente, en principe, un certain avantage, car elle retarde le phénomène de tassement du gâteau et facilite donc le drainage des boues très compressibles.

2.1.3. Siccité limite

Si l'on filtre une boue sous pression différentielle élevée (de 5 à 15 bars), la courbe de filtration

$$\frac{t}{v} = f(v)$$

présente l'allure caractéristique de la figure 620.

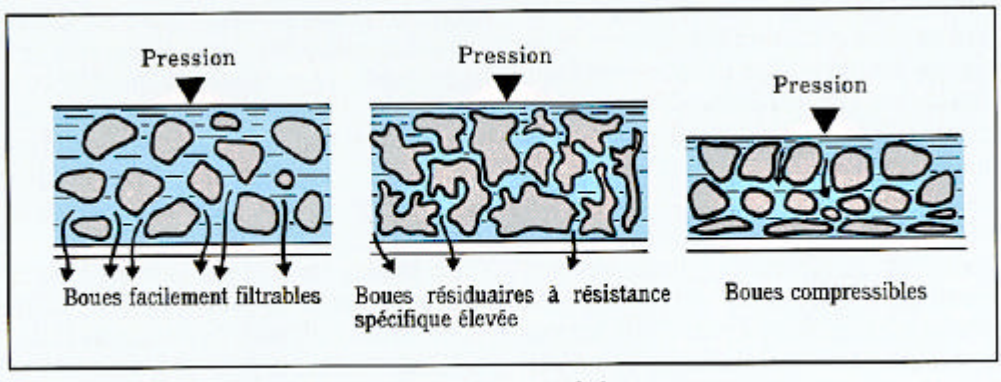


Figure 619. Structure schématique de différents types de boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

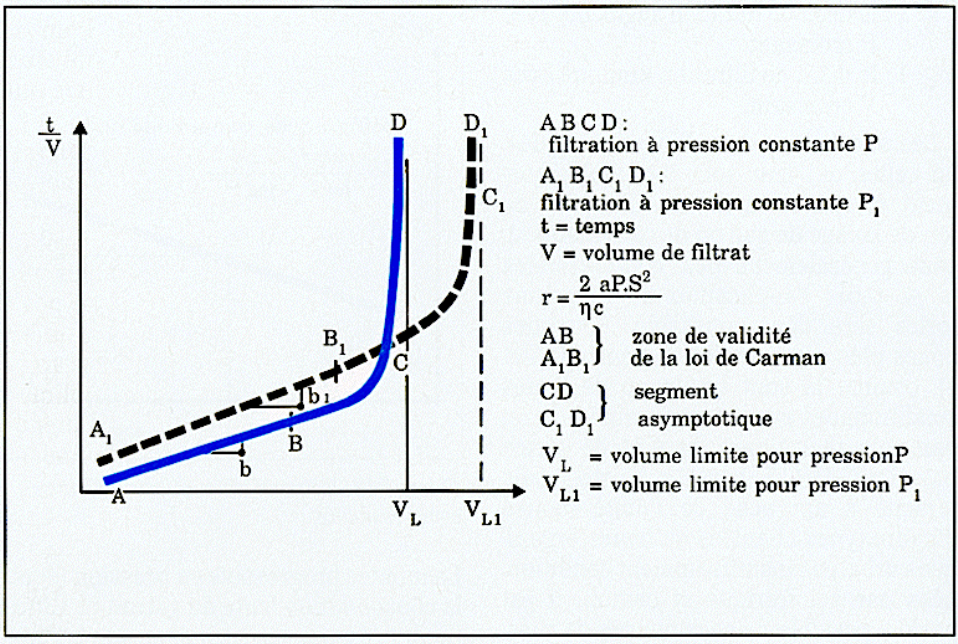


Figure 620. Filtration sous différentes pressions.

On voit que la courbe présente deux parties principales

- une partie rectiligne AB où la loi générale de la filtration est respectée, comme dans le cas d'une pression différentielle plus réduite (0,5 à 1 bar par exemple),

= une partie asymptotique CD, telle qu'une augmentation du temps de filtration ne permet plus un accroissement du volume de filtrat. Des phénomènes complexes, tels que tassement différentiel du gâteau, déformation des agglomérats de matière sous l'effet de la pression, conduisent à ce "blocage".

On définit précisément comme "siccité limite" S_L, la siccité du gâteau obtenue après un temps "infini" de filtration (en pratique lorsqu'il n'y a plus d'écoulement de filtrat). Le volume de filtrat V_L est une fonction logarithmique de la pression P.

La droite de Carman se complète d'une partie asymptotique définie par

$$\frac{t}{V} = aV + \frac{KV}{(V_L - V)\,V_L}$$

L'établissement des courbes $S_L = f(P)$ permet de déterminer, approximativement, dans le cas de filtration à forte pression, la pression sous laquelle il est nécessaire d'opérer pour obtenir une siccité désirée. La pression choisie doit être telle que le point de fonctionnement se trouve en-deçà du point C si l'on veut rester dans des conditions d'exploitation acceptables (cadence de filtration suffisamment rapide).

La valeur de S_L est une indication essentielle pour la prévision des performances des différents appareils de filtration mécanique, et pour la définition des filières de traitement des boues: choix du

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

conditionnement qui influe ou non sur la siccité limite, ou choix de la pression mise en oeuvre

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs de siccité limite S_L à 15 bars

Type de boue (et conditionnement)	S_L(%MS)
Aération prolongée avec polyélectrolyte	22-26
Aération prolongée avec $FeCl_3$+ chaux	33-38
Mixte* digérée avec conditionnement thermique	60-68
Mixte digérée avec $FeCl_3$ + chaux	42-48
Mixte digérée avec polyélectrolyte	26-32
Décarbonatation (sans magnésie)	75-85
Boue activée avec polyélectrolyte	15-18
Pâte à papier 80 % fibres	32-36

* 50 % de boues primaires peu fibreuses et 50 % de biologiques.

S_L, ne peut être dépassée que par mise en oeuvre d'énergie thermique. Pour un conditionnement donné, la siccité obtenue industriellement ne peut donc que s'approcher, plus ou moins, de cette valeur S_L, en fonction de l'importance et du mode d'application de l'énergie mécanique mise en oeuvre.

Sur des boues organiques très protidiques (boues stabilisées aérobies par exemple), conditionnées aux polyélectrolytes, et présentant une faible valeur de SL, il est inutile de faire appel à des appareils permettant d'appliquer de fortes pressions: la siccité obtenue sous 1 bar est déjà très voisine de la siccité S_L.

2.2. LITS DE SÉCHAGE

2.2.1. Lits de sable

Le séchage des boues sur des lits de sable drainés, longtemps la technique la plus utilisée, est en régression continue du fait:

- des grandes surfaces de terrain nécessaires,
- des dépenses de main-d'oeuvre qu'elle entraîne,
- des performances très dépendantes des conditions climatiques, ne permettant pas, dans bien des régions, une évacuation régulière des boues produites. Dans les régions tempérées, la durée possible de séchage naturel est d'une centaine de jours par an.

Des lits de séchage de grande dimension sont réalisables s'ils sont équipés de ponts mobiles permettant la récupération mécanisée des boues séchées, ainsi qu'une distribution des boues liquides sur toute la surface (figure 623).

La déshydratation naturelle n'est à retenir que sur des boues bien stabilisées (digérées anaérobies ou éventuellement d'aération prolongée).

Les temps de séchage varient de trois semaines à un mois et demi, pour sécher 30 à 40 cm de boue liquide, selon les conditions climatiques.

Les aires de séchage sont généralement ainsi constituées (figure 622)

- première couche support de gros cailloux avec une couche de graviers (15-30 mm) de l'ordre de 20 cm. Des drains sont aménagés au fond de cette couche support,
- deuxième couche filtrante de sable (0,5 à 2 mm) de l'ordre de 10 à 15 cm.

Le système de drainage doit évidemment se situer au-dessus de la nappe phréatique.

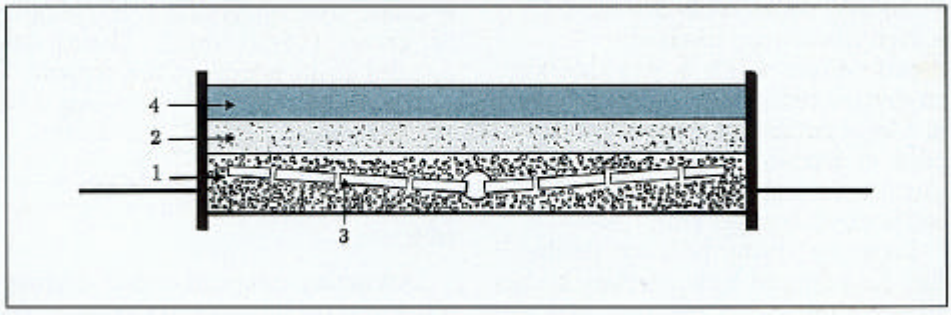
La déshydratation comporte une première phase de drainage, une seconde de séchage atmosphérique. La siccité peut atteindre 40 et même 60 % en cas d'ensoleillement optimal.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Si les lits sont alimentés en un seul point, il est difficile de dépasser une largeur de 8 m pour une longueur de 20 m. La mécanisation du ramassage des boues séchées permet de réaliser des modules de 20 m de large et de 1 km de long (figure 624). L'investissement devient cependant assez lourd

Une amélioration du rendement des lits de séchage peut être obtenue par conditionnement des boues à l'aide de polyélectrolyte; sa mise en oeuvre est aisée et se généralise. Les vitesses de drainage sont ainsi considérablement améliorées. Néanmoins, le temps de séchage demeure toujours tribu-

Figure 621. Lits de séchage non mécanisés 8 X 20 m.



1 - Gravier. *3 - Drains.*

2 - Sable. *4 - Boue.*

Figure 622. Coupe type d'un lit de séchage

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

taire des conditions climatiques. Lorsque celles-ci sont très favorables, un séchage peut être obtenu en deux semaines. Dans les pays humides, une couverture des lits peut être recommandée, mais le procédé devient peu concurrentiel avec les filtres mécaniques de déshydratation.

Dès que la dimension de la station le permet, la solution la plus sûre est de prévoir un poste de filtration mécanique de secours pour les périodes de l'année où les lits ne sont plus opérationnels.

Figure 623. Installation d'ACHÈRES (Yvelines) pour le S.I.A.P.P. Pont roulant d'épandage et ramassage des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 624. Installation at Achères, Paris area, France, for the S.I.A.A.P. Aerial view of mechanised drying beds (20 ha).

Figure 624. Installation d'ACHÈRES (Yvelines) pour le S.I.A.P.P. Vue aérienne des lits de séchage mécanisés (20 ha).

2.2.2. Lits de séchage DEHYDRO

La configuration d'ensemble rappelle celle des lits conventionnels mais la couche de sable est remplacée par un plancher rigide et perméable. Avec cette technique, de fortes siccités ne sont pas recherchées: priorité est donnée à une rotation rapide des lits (cycles de 24 à 48 h) aux dépens de la phase de séchage. Pour cela, la boue est préfloculée au polyélectrolyte avant d'être envoyée sur le plancher constitué de plaques poreuses (obtention d'un filtrat bien clarifié). Après une première phase de drainage, la zone sous plancher est mise sous faible dépression, pour parfaire l'écoulement de l'eau interstitielle libérée par la floculation. Le gâteau, rapidement drainé de ce fait, est ensuite consolidé par un rapide séchage atmosphérique. Il est ramassé manuellement ou, le plus souvent, avec une petite pelle mécanique. La surface du lit est nettoyée au jet entre chaque cycle, avec l'objectif de prévenir les phénomènes de colmatage.

Ces lits sont adaptés aux petites et moyennes stations d'épuration. Les cycles très courts permettent de déshydrater environ 300 à 600 kg MES par jour et par lit de 72 m^2 (6 *x* 12 m), tout en produisant des sédiments de siccité modeste, mais cependant manipulables (12 à 16 % de siccité pour une boue d'aération prolongée et 11 à 17 % pour une boue d'eau potable).

2.3. FILTRATION SOUS VIDE

Ce procédé, le plus ancien de déshydratation mécanique continue, n'a plus aujourd'hui que des applications limitées. Les filtres utilisés pour l'essorage des boues résiduaires sont du type à tambour rotatif (surface pouvant atteindre 80 m^2 et à auge ouverte. D'autres types de filtres (filtres à disques) n'ont eu que très peu d'applications.

2.3.1. Description etfonctionnement

Le filtre rotatif à tambour (figure 625) est essentiellement constitué d'un cylindre tournant, partiellement immergé dans un bac qui contient la boue à filtrer. Ce cylindre est formé par la juxtaposition d'un certain nombre de compartiments étanches les uns par rapport aux autres, et recouverts d'une toile unique de filtration. Les compartiments sont mis successivement sous vide ou à l'atmosphère, par l'intermédiaire d'un "distributeur".

Le cycle de filtration s'établit ainsi

a - Partie immergée du tambour: par l'effet du vide la matière retenue sur la toile s'accumule, formant le "gâteau" qui va s'épaississant (1 à 3 cm). Le temps de filtration est de l'ordre de 1 à 2 min.

b - Partie supérieure du tambour: la couche de gâteau humide sort de l'auge et, toujours sous l'effet du même vide, s'essore pendant plusieurs minutes, pour former un gâteau, de cohésion suffisante, voire craquelé.

c - Évacuation du gâteau: après une rotation quasi complète, les compartiments sont mis hors vide, la toile de filtration, jusque-là appliquée étroitement sur le tambour, s'en écarte, permettant ainsi, d'une part le décollement et l'évacuation du gâteau (5 à 15 mm), et d'autre part le lavage à l'eau sous pression du support

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

filtrant. Par le lavage continu de la toile, le filtre sous vide peut donc avoir des performances stables dans le temps, et peut aussi fonctionner avec de faibles épaisseurs de gâteaux.

La filtration des boues se réalise sous des vides industriels de 300 à 600 mm de mercure. La vitesse de rotation du tambour varie entre 8 et 15 tours par heure. Les toiles filtrantes sont constituées de fibres synthétiques, et le vide de maille. peut varier de 30 à 100 µm (MES des filtrats généralement inférieures à 300 $mg.l^{-1}$).

Dans le cas de boues très colmatantes (grasses, par exemple), on peut utiliser des filtres à tambour à précouche (sciure de bois souvent) qui fait alors office de support filtrant: un racleur, équipé d'une avance micrométrique, évacue avec le gâteau une pellicule de précouche. Ce procédé à précouche n'est plus

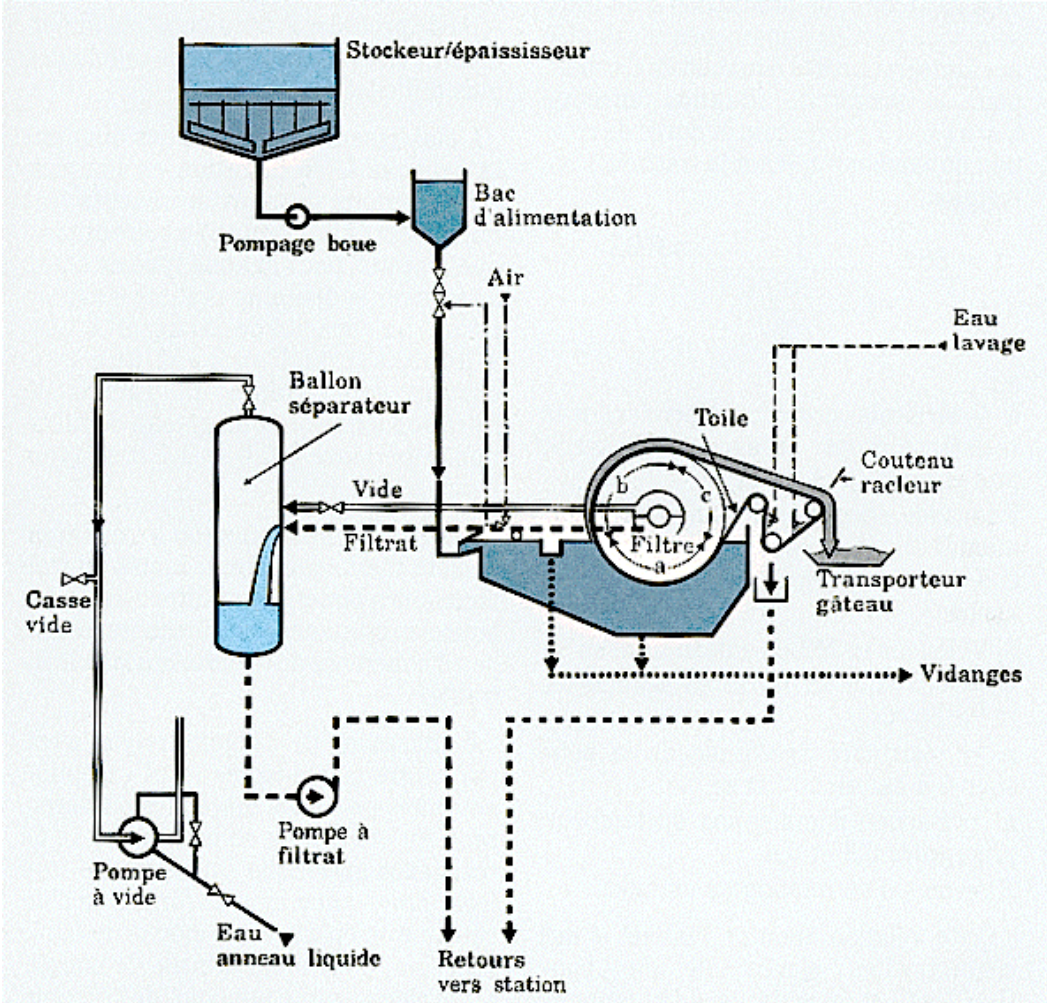


Figure 625. Filtre rotatif sous vide à sortie de toile.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

que très peu employé, la centrifugation s'imposant normalement pour le traitement de ces boues huileuses.

2.3.2. Capacité de production

Elle est exprimée en kg de MS retenues par m2 de surface de tambour et par heure. Une capacité de filtration exploitable doit dépasser 15 kg/m^2.h.

La capacité L de production d'un filtre sous vide peut être approchée et calculée par l'intégration de l'équation de Carman, pour le temps de filtration effective $t_f = nT$ (où T représente la durée de rotation du tambour, n étant la fraction d'immersion)

$$L = 652 \cdot \frac{1}{1 - \frac{100\ C}{S_F}} \cdot \left[\frac{n.P.C.}{T.r.\eta}\right]^{0,5} \cdot k$$

où

k =terme de correction dépendant de la résistance propre du support filtrant (k pris entre 0,75 et 0,85),

P = vide effectif en kg.cm^{-2} (généralement 0,5),

C = concentration de la boue en kg.dm^{-3},

S_F = teneur en MS du gâteau filtré en %,

? = viscosité du filtrat en centipoises (1,1 à 20 °C),

r = résistance spécifique de la boue sous 0,5 bar en 10^{11} m.kg^{-1},

n = fraction d'immersion du tambour, prise entre 0,3 et 0,4,

T = temps de rotation en minutes.

Cette relation montre l'intérêt d'une concentration élevée de la boue $(L = k\sqrt{C})$ et du maintien de la propreté de la toile filtrante (facteur k).

2.3.3. Détermination du taux de conditionnement chimique

Pour obtenir un fonctionnement acceptable, la résistance spécifique à la filtration r doit être très faible, comprise entre 1 et 3.10^{11} m.kg^{-1}. Ceci impose

- de réserver le filtre sous vide aux boues denses, minérales, de très bonne filtrabilité naturelle (boues de décarbonatation par exemple),
- ou de procéder à des ajouts très importants de réactifs sur des boues colloïdales plus difficiles.

L'établissement des courbes donnant la capacité L de filtration en fonction des différents dosages de réactifs (sel ferrique et chaux pour une boue organique) permet, pour chaque type de boue, de trouver le domaine réaliste d'exploitation. La capacité de 20 kg/m^2.h. est à dépasser si l'on veut une évacuation satisfaisante du gâteau de filtration (épaisseur du gâteau de filtration supérieure à 0,6 - 0,7 mm) (voir figure 626).

Les réactifs minéraux (ou le conditionnement thermique) sont adaptés au traitement des boues avant filtre sous vide: bonne consistance du gâteau essoré et peu d'adhérence de ce dernier à la toile filtrante.

L'utilisation de polyélectrolyte n'est, par contre, pas adaptée (sauf exception sur quelques boues minérales ou fibreuses). En effet, dans ce cas, la baisse de résistance spécifique est beaucoup trop forte, provoquant ainsi la formation d'un gâteau trop épais, assez mou et de faible cohésion. Il est alors difficile de maintenir le gâteau sur le tambour, de l'essorer, puis de le racler.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

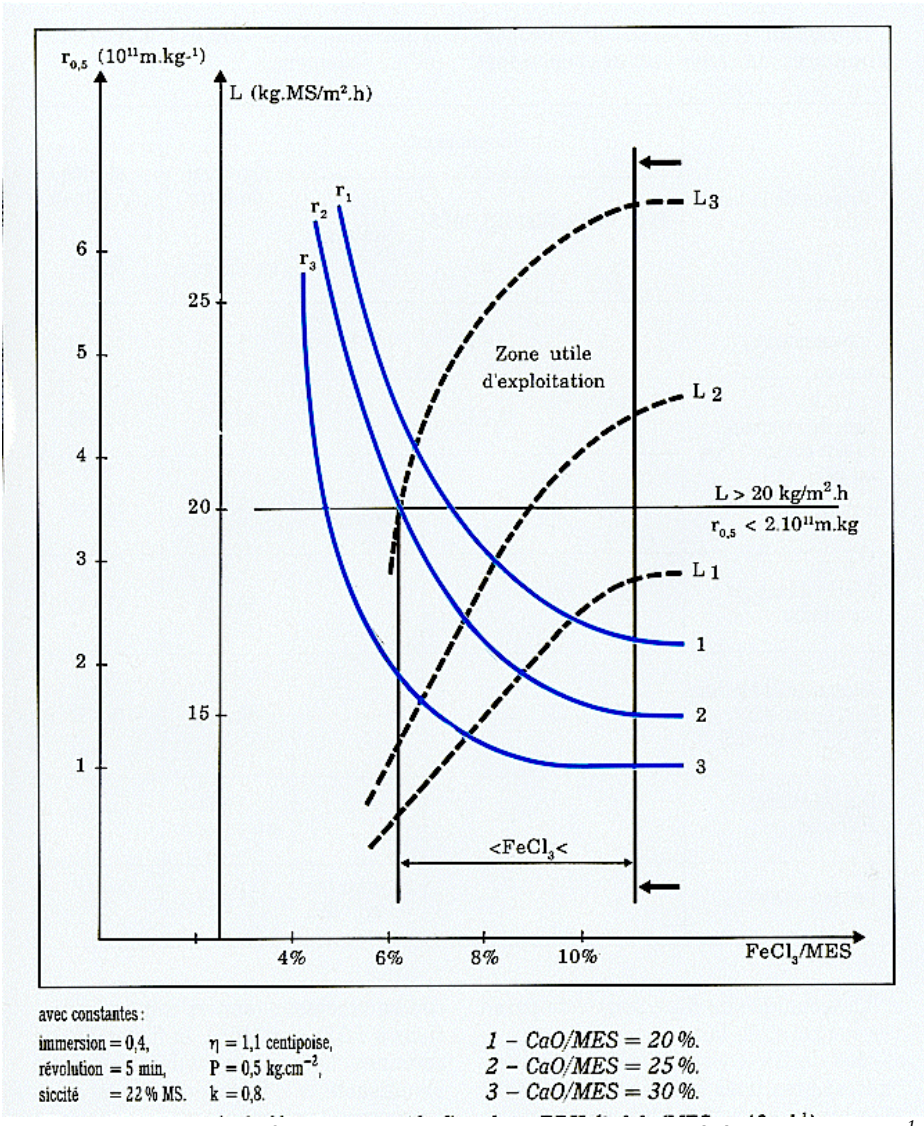


Figure 626. Exemple de filtration sous vide d'une boue ERU digérée (MES = 40 g.l^{-1}). Filtrabilité et capacité L en fonction de [$FeCl_3/Ca(OH)_2$].

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le tableau ci-après donne quelques performances indicatives sur des boues dont la filtration sous vide est envisageable industriellement:

Origine de la boue	**Conditionnement**			**Capacité du filtre** kg MS/m^2.h	**Siccité du gâteau** % MS
	$FeCl_3$/ MES %	**$Ca(OH)_2$/ MES** %	**Autres**		
Primaire urbaine	3 - 5	15 - 20	-	25 - 30	26 - 32
Mixte digérée urbaine (% boue primaire> 75 sur MES)	6 - 8	30 - 35	-	20 - 25	22 - 26
	-	-	Conditionnement thermique	18 - 25	26 - 33
Aciérie - Lavage gaz convertisseurs	-	-	-	50 - 70	55 - 65
Décarbonatation à la chaux (Fe < 1 % sur MES (Mg < 0,5 % sur MES)	-	-	-	40 - 60	40 - 50
Huileuse décantée (Raffinerie)	-	25 - 30	-	7 -13 avec précouche	30 - 35
Lavage de charbon	-	-	Polyélectrolyte 0,3 $kg.t^{-1}$ MES	25 - 30	35

La technique du filtre sous vide paraît en net recul du fait

- des fortes consommations d'énergie nécessaires pour la mise sous vide (de l'ordre de 80 à 150 kWh par tonne de MES pour une boue mixte urbaine),
- des dosages prohibitifs de réactifs avec la majorité des boues organiques ou d'hydroxydes. Même avec un très fort conditionnement (apport minéral supérieur à 50 % sur MES), la filtrabilité de certaines boues très colloïdales reste insuffisante, et le filtre sous vide est alors à proscrire totalement,
- des contraintes d'entretien (détartrage des circuits de mise sous vide, de la pompe à anneau liquide et de la toile filtrante).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

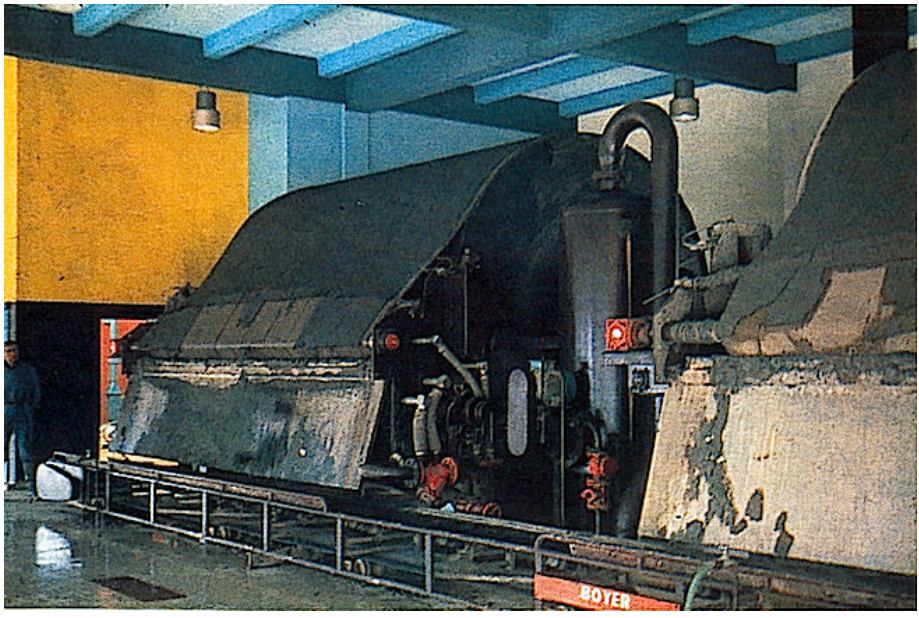


Figure 627. Installation de LILLE-MARQUETTE (Nord) pour la Communauté Urbaine de Lille. Capacité: 4 t.j^{-1} de MS. 2 filtres sous vide de 40 n^2.

2.4. FILTRATION SOUS PRESSION EN CHAMBRES ÉTANCHES

Elle est assurée sur des filtres-presses permettant d'appliquer **sur le gâteau** des pressions très **élevées** (5 à 15 bars et parfois plus).

Ceci permet d'obtenir des siccités de gâteaux généralement supérieure à 30 sur la majorité des boues organiques ou d'hydroxydes, convenablement conditionnées.

2.4.1. Filtres-presses à plateaux chambrés classiques

Cette technique est la plus répandue, malgré le caractère discontinu de son fonctionnement L'investissement est relativement élevé par rapport à celui d'autres procédés, tels que, notamment, les filtres à bandes presseuses (voir page 994).

2.4.1.1. Description générale

Un filtre est constitué essentiellement par une batterie **de plaques (1) évidées**, **verticales, juxtaposées** et appuyées fortement les unes contre les autres par un(des) vérins) hydrauliques) (2) placés) à une des extrémité de la batterie (voir figure 628).

Cette disposition, en plaques verticales formant des chambres **étanches** (3) de filtration, permet une mécanisation aisée pour la décharge des gâteaux ("débâtissage").

Sur les deux faces cannelées des plaques, sont appliquées des toiles filtrantes (4) de mailles assez fines, voire parfois très serrées: 10 à 300 µm.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les boues à filtrer arrivent (5), sous pression, dans les chambres de filtration par l'intermédiaire d'orifices (6) aménagés généralement au centre des plateaux

l'alignement de ces orifices constitue le conduit d'alimentation en boue. L'alimentation centrale permet une bonne répartition, dans toute la chambre, du débit, de la pression et, par là-même, du drainage.

Les matières solides boueuses s'accumulent progressivement dans la chambre de filtration, jusqu'à formation d'un gâteau final compacté.

Le filtrat est recueilli dans les cannelures à l'arrière du support filtrant, et évacué au moyen de conduits internes (7) : ce mode d'évacuation réduit les nuisances (odeurs ...) et il est préféré à la sortie "plaque par plaque" tout au moins dans le 978 traitement de boues organiques.

La pression appliquée sur les plans de joints de chaque plateau filtrant doit résister à la pression interne de la chambre, développée par le système de pompage de la boue. La pression engendrée par le(les) vérin(s) de serrage des plaques

est uniformément répartie grâce à une tête mobile intermédiaire. Celle-ci est généralement montée sur rotules ou coussinets, de façon à ce que la poussée s'exerce toujours selon un axe horizontal, même en cas d'accumulation de boues séchées sur les plans de joints inférieurs, après un certain temps de fonctionnement

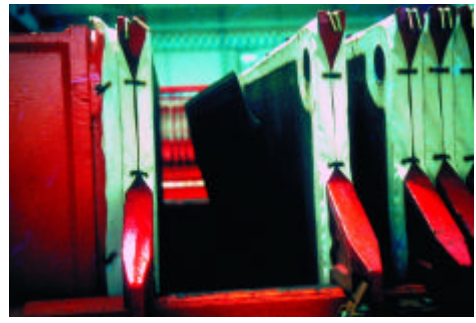


Figure 629. Décharge d'un gâteau de filtre-presse.

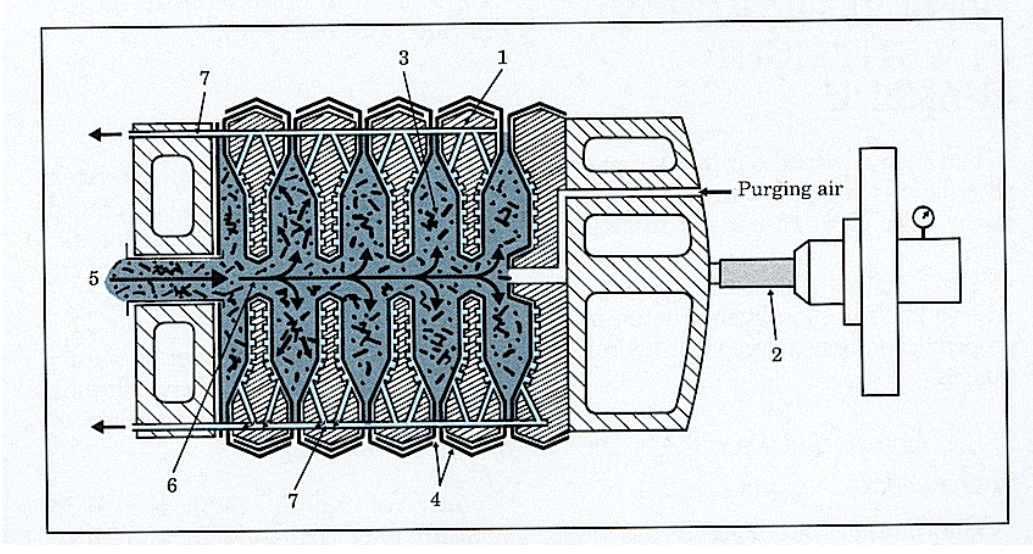


Figure 628. Schéma simplifié d'un filtre-presse.

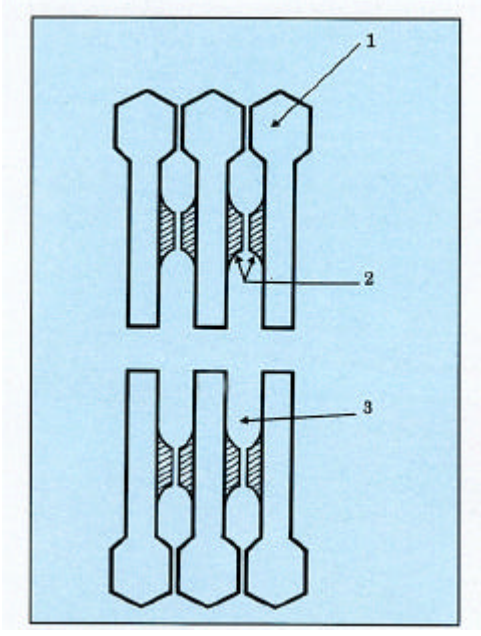
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.4.1.2. Technologies de mise en oeuvre

Elles se différencient essentiellementpar - le supportage des plaques filtrantes soit latéral sur deux barres longitudinales (voir figure 630), soit par accrochage à un ou deux rails supérieurs (voir figure 631),

- le système de halage des plateaux, un à un (électromécanique ou hydromécanique),
- le système de serrage: un ou plusieurs vérins (hydrauliques généralement),
- le système de lavage des toiles,
- et, bien sûr, les coefficients de sécurité adoptés dans le calcul du bâti-support.

Les plus grandes unités de filtres-presses comprennent jusqu'à 150 plateaux de



1 - Plateau.

2 -Bossages.

3 -Chambre.

Figure 630. Détail d'une chambre de filtration avec bossages.

2 m de côté: la surface totale de filtration atteint alors 1000 m^2 environ et le volume des chambres 15 0001 (avec des gâteaux de 3 cm d'épaisseur) pour une surface au sol inférieure à 40 m^2

De petites unités existent également, pouvant ne comporter qu'une vingtaine de plateaux de 0,4 m de côté (moins de 5 m^2 de surface filtrante).

Généralement, les **pressions appliquées** sont de 13 -15 bars. Sur certaines boues, dont la siccité obtenue à 5 - 7 bars est proche de la siccité limite, des filtres-presses construits pour ces pressions sont utilisables.

La profondeur des chambres de filtration (et donc **l'épaisseur finale du gâteau),** doit être choisie en fonction de la nature de la boue. Pour des boues difficiles à filtrer et peu concentrées, des épaisseurs assez faibles sont à retenir (25 mm environ). Pour des boues denses, de très bonne filtrabilité, des fortes épaisseurs (40 à 50 mm) évitent d'avoir des cycles trop courts, pénalisants. L'épaisseur la plus couramment rencontrée se situe aux environs de 3 0 mm; elle permet d'obtenir des gâteaux lourds, débâtis plus facilement: c'est l'épaisseur généralement adoptée sur la majorité des boues urbaines, pour des temps de cycle de 2 à 4 heures.

Les plateaux sont exécutés en différents matériaux: le polypropylène est le plus utilisé pour les unités moyennes. La fonte reste employée pour les filtres de très grande dimension. L'acier, revêtu de caoutchouc moulé, est parfois également mis en oeuvre

Chaque plateau comporte plusieurs bossages (voir figure 633) uniformément répartis: ceux-ci évitent la déformation, voire la casse, de la partie centrale des plaques filtrantes, en cas de remplissage incomplet du filtre-presse.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Si une chambre de filtration reste vide ou incomplètement remplie, l'effort provenant des chambres juxtaposées est alors supporté par les bossages disposés en vis-à-vis, au lieu de l'être, comme normalement, par le gâteau lui-même.

Les toiles filtrantes, dans la majorité des cas, sont des toiles tissées en fibres synthétiques monofilament (polypropylène ou polyamide-Rilsan, généralement). La toile est le plus souvent montée sur une sous toile plus grossière. Celle-ci permet une meilleure évacuation du filtrat, un lavage plus efficace, et réduit les tensions sur la toile fine de filtration, surtout en fin de pressée. Avec des boues d'hydroxydes très colloïdales, des toiles multifilaments, plus fermées, sont utilisées pour éviter trop d'entraînement de 980 fines dans les filtrats.

2.4.1.3. Cycle de filtration

Le filtre-presse est un procédé de déshydratation discontinu. Il opère par pressées successives.

Chaque pressée comprend les différentes phases suivantes

- **Fermeture de la presse**

Le filtre étant complètement vide, la tête mobile, actionnée par le(les) vérin(s), serre les plateaux entre eux. La pression de fermeture est autorégulée pendant toute la filtration.

- **Remplissage**

Durant cette phase de courte durée (5 à 10 minutes), les chambres de filtration sont remplies de boue à filtrer. Le temps de remplissage dépend du débit de la pompe d'alimentation. Avec des boues de très bonne filtrabilité ($r_{0,5} < 10^{11}$ m.kg^{-1}), il est préférable de remplir le filtre très

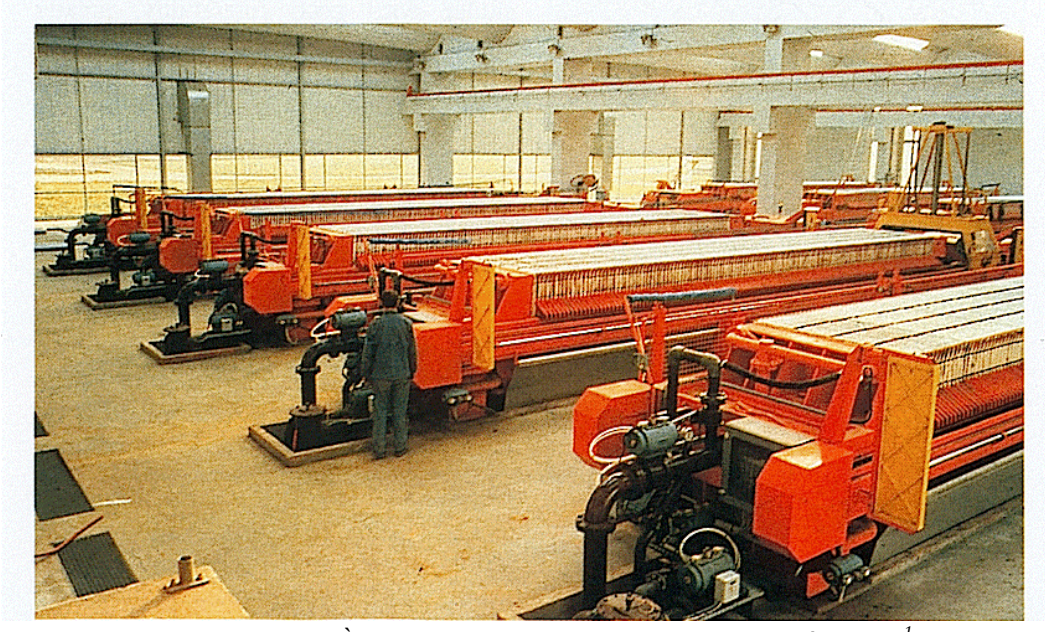


Figure 631. Installation d'ACHÈRES (Yvelines) pour le S.I.A.P.P. Capacité: 230 t.j^{-1} de MS. 10 filtres presses à suspension latérale.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

vite, de façon à éviter la formation d'un gâteau dans les premières chambres avant que les dernières ne soient remplies.

- **Filtration**

Une fois les chambres remplies, l'arrivée continue de la boue provoque une montée en pression, par suite de la formation d'une couche de boue filtrée de plus en plus importante sur les toiles filtrantes. La pression maximale de filtration est généralement atteinte en une demi-heure. Les durées de filtration peuvent varier de 1 à 6 heures, selon la profondeur des chambres et la filtrabilité de la boue.

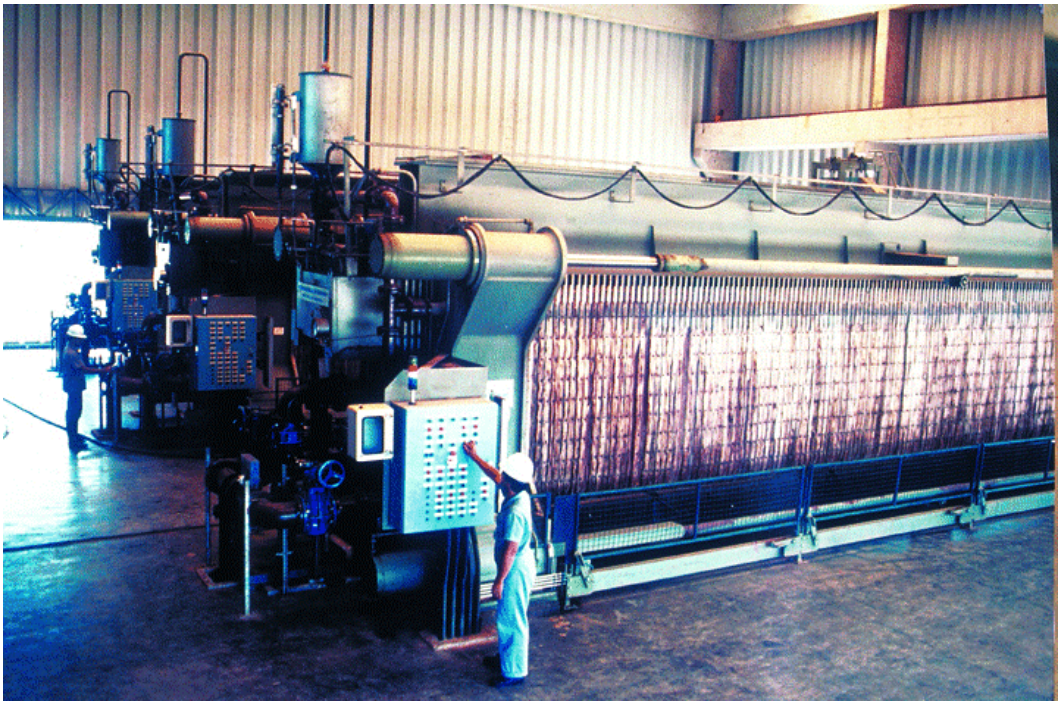


Figure 632. Installation de BARUERI (Brésil) pour la ville de SAO PAULO. 3 filtres presses de 150 plateaux de 2 m X 2 m à suspension sur rail.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 633. Petit filtre presse à plateaux 600 X 600 mm.

La phase de filtration peut être arrêtée

- soit manuellement,
- soit par minuterie,
- ou, plus judicieusement, par un indicateur de débit de filtrat: cet indicateur émet le signal d'arrêt pour un débit de fin de filtration de l'ordre de 10 à 20 1 par m^2 de surface filtrante et par heure.

Lorsque la pompe de filtration est arrêtée, les circuits de filtrat et la conduite centrale encore remplie de boue liquide, sont purgés avec de l'air comprimé.

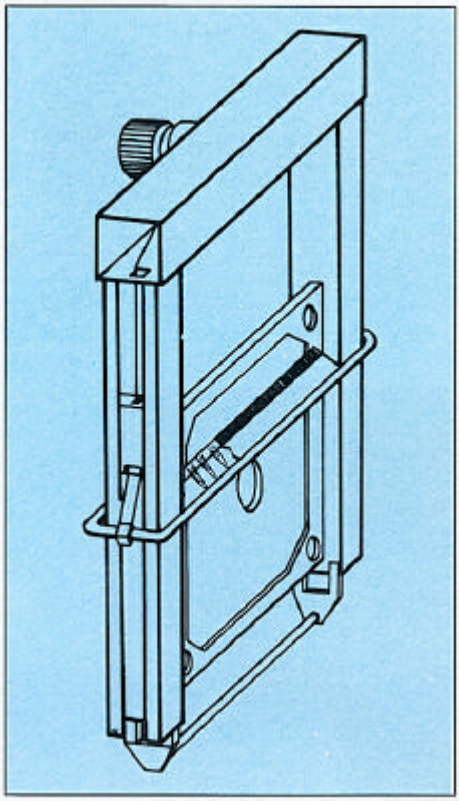


Figure 634. Schéma d'un laveur automatique intégré pour équipement d'un filtre-presse à suspension sur rail.

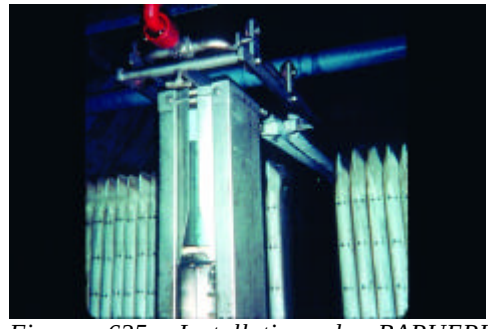


Figure 635. Installation de BARUERI (Brésil) pour la ville de SAO PAULO

Figure 636. Installation de MOULLE (Pas-de-Calais) pour la Lyonnaise des Eaux. Débit: 2 000 $m^3.h^{-1}$. Production d'eau potable.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Débâtissage**

La tête mobile est reculée pour dégager la première chambre de filtration. Le gâteau formé tombe de son propre poids. Par un système mécanisé, les plateaux sont alors tirés un à un. La vitesse de halage est généralement modifiable pour tenir compte de la texture plus ou moins collante des gâteaux.

En fonctionnement normal, les durées de débâtissage sont de l'ordre de 20 à 30 minutes pour les grandes unités.

Cette phase réclame la présence d'un surveillant: un taux de conditionnement minimal, des toiles ou rainures encrassées, obligent souvent à intervenir manuellement pour assurer l'éjection complète du gâteau qui peut rester collé.

Le filtre-presse, comparativement aux autres appareils de déshydratation, nécessite donc plus de main d'oeuvre, en particulier à cause de la surveillance du débâtissage ; toutefois, toutes les autres séquences du cycle peuvent être automatisées.

A ces quatre phases du cycle de filtration il faut ajouter la phase très importante de nettoyage: nettoyage du support filtrant, mais également **nettoyage** des rainures d'évacuation des filtrats.

Le nettoyage des toiles s'effectue toutes les 15 ou 30 pressées. Pour les moyennes ou grosses unités, il s'effectue, in situ, à l'aide de laveurs à pulvérisation d'eau sous très forte pression (80 -100 bars) (figures 634, 635 et 636) synchronisés avec le halage des plateaux. Le lavage d'un filtre dure de 2 à 4 heures et certains constructeurs proposent des laveurs entièrement automatisés, donc travaillant sans surveillance.

La carbonatation des toiles peut être combattue, soit par trempage des toiles démontées, dans un décapant approprié, soit directement dans le filtre fermé, par circulation de solution de HCI.

Lorsque le laveur haute pression ne permet plus un nettoyage correct des rainures des filtres (boues et chaux trop compactées) un sablage peut alors être mis en oeuvre sur les plateaux en fonte (tous les 3 à 6 000 cycles).

2.4.1.4. Capacité de filtration

La capacité de production d'un filtre-presse se situe généralement entre 1,5 et 10 kg MS par m^2 de surface filtrante et par heure (pour des temps de pressée de 6 à 1 heure).

Dans la pratique, les temps de pressée choisis restent inférieurs à 4 heures. Un des avantages du filtre-presse est d'accepter des ***boues*** de filtrabilité moyenne; avec des boues *de* concentration élevée, une résistance $r_{0,5}$ *de* l'ordre de 50.10^{11} $m.kg^{-1}$ est encore admis*sible,* tandis qu'avec des boues de concentration d'environ 40 $g1^{-1}$, une résistance $r_{0,5}$ de 15 à 20.10^{11} $m.kg^{-1}$ est nécessaire. Pour conserver des temps de pressée raisonna*bles* (2 à 3 h environ avec des gâteaux d'épaisseur de 3 cm) des résistances de 5 à 10.10^{11} $m.kg^{-1}$ doivent être obtenues.

Tout cela, bien entendu, si le coefficient de compressibilité est inférieur à 1, et de préférence inférieur à 0,8.

En fonction de la résistance spécifique r et de la compressibilité s (facteurs déterminés en laboratoire - voir pages 3 72 et 374), un calcul approché du temps de filtration peut être déduit des lois de la filtration (voir page 178) avec introduction d'un facteur de correction k pour tenir compte du colmatage des toiles:

$$t_f = k.0{,}2125 \cdot \frac{\eta.r.2^S.e^2.C}{p^{1-S}} \cdot \left[\frac{S_F.d_g}{C} - 1\right]^2$$

où:

t_f = temps de filtration en minutes,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

C = concentration de la boue conditionnée (MES) en $kg.l^{-1}$,

d_g = masse volumique du gâteau final en $kg.l^{-1}$,

? = viscosité du filtrat en centipoises (1,1 à 20°C),

r ou $r_{0,5}$ = résistance spécifique sous P = 0,5 bar de la boue conditionnée, en 10^{11} $m.kg^{-1}$,

s = coefficient de compressibilité,

P = pression maximale de filtration en $kg.cm^{-2}$,

e = épaisseur de la chambre de filtration en cm,

S_F = siccité finale des gâteaux en fraction de leur masse,

k = coefficient de colmatage des toiles (k =1,2 à 1,3 jusqu'à 500 pressées environ, puis k = 1,5 au-delà).

La capacité L de production du filtre, en MES de boues conditionnées, est donnée par:

$$L = \frac{e.d_g.S_F}{0,2.t_{cy}} \text{ kg/m}^2\text{.h}$$

avec:

t_{cy} = temps (h) de cycle total = $t_f + t_d + t_r$,

où:

t_d = temps de débâtissage et de refermeture du filtre,

et:

t_r = temps de remplissage du filtre (5 à 15 min).

Dans la pratique, la capacité de production du filtre est déduite du séchage du gâteau à 105 °C, et s'exprime donc en kg MS/m^2.h (chapitre 5, § 6.2.1).

Le temps de filtration est fonction essentiellement

- de l'épaisseur du gâteau, (e^2).
- de la concentration en boue, (1/c),
- de la résistance spécifique $r_{0,5}$ 25
- du coefficient de compressibilité

$$\left(\frac{2^s}{p^{1-s}}\right).$$

Il est notamment d'un grand intérêt de toujours épaissir au mieux les boues avant passage sur filtre-presse. Si de bonnes filtrabilités de boues permettent d'augmenter les capacités de production, le filtre-presse accepte cependant une moindre précision du conditionnement et, par suite, présente une grande sécurité d'exploitation.

Après les premières minutes, les filtrats récupérés sont généralement peu chargés en MES, car la filtration s'effectue au travers d'une précouche de gâteau en formation: les filtres-presses permettent ainsi d'atteindre les rendements de séparation les plus élevés (supérieurs à 95 % dans bien des cas).

2.4.1.5. Performances

Le tableau 81 montre que le filtre-presse est un appareil applicable à presque tous les types de boues avec, par groupe de boues, les remarques générales suivantes:

- **boues organiques hydrophiles:** le conditionnement minéral est souvent recommandé, car le conditionnement à la chaux permet un débâtissage satisfaisant des gâteaux (adhérence minimale des gâteaux sur la toile). L'emploi de polyélectrolyte est possible (voir § 1.1.2) mais les gâteaux spongieux sont souvent plus longs et difficiles à débâtir; l'encrassement des toiles est aussi, dans ce cas, plus rapide: lavage parfois nécessaire toutes les 5 à 10 pressées. L'utilisation de polyélectrolytes, en lieu et place de la chaux, doit donc être décidée après tests industriels, car l'universalité du procédé n'est pas assurée, et les exploitants renoncent parfois à débâtir des gâteaux trop collants. Les boues à tendance fibreuse sont les mieux adaptées au conditionnement par polyélectrolyte,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **boues minérales hydrophiles:** le filtrepresse requiert généralement l'addition de chaux seule;
- **boues minérales hydrophobes:** ces boues denses sont très adaptées au filtrepresse et sont déshydratées sans conditionnement préalable. Ceci est dû principalement au faible coefficient de compressibilité (inférieur à 0,6) et à la nature cristalline des particules. Dans ce cas, la granulométrie des particules est déterminante pour les capacités de production. Les siccités obtenues sont très souvent supérieures à 50 % ;
- **boues huileuses:** les huiles sont présentes sous forme émulsionnée, ou sont adsorbées aux particules. Le filtre-presse permet de traiter les boues contenant des huiles légères (avec souvent récupération d'huiles dans les filtrats). La présence de graisses peut parfois perturber la bonne marche du filtre: les toiles sont alors à dégraisser fréquemment. Le chaulage est ici encore le conditionnement le plus adapté.

2.4.1.6. Mise en oeuvre

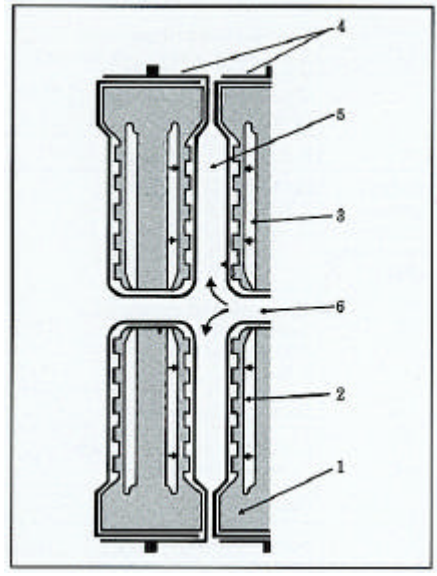
Le débit d'alimentation d'un filtrepresse, à peu près constant tout au début de la filtration, décroît ensuite régulièrement avec le temps. L'asservissement du conditionnement minéral au débit d'alimentation du filtre est donc pratiquement impossible. Ceci oblige à installer un volume tampon intermédiaire pour stocker la boue conditionnée pendant le cycle de filtration. Le conditionnement est donc totalement indépendant du rythme de filtration (figure 607).

Avec polyélectrolyte cependant, dans le cas où la qualité des boues le permet, la floculation, quasi instantanée, peut s'effectuer en conduite, à débit proportionnel au débit de boue.

Le **mode d'alimentation** des filtres-presses mérite la plus grande attention. Des pompes à pistons et membranes sont utilisées de préférence, avec ajustement automatique du débit en fonction de la perte de charge dans le filtre.

Il est également possible d'utiliser des pompes à rotor excentré ou à pistons, mais ces pompes, de débit plus modeste, sont toutefois plus sensibles aux usures.

Sur des boues denses très filtrables et dans le cas de grosses unités, un remplissage par pompe centrifuge à fort débit permet une alimentation rapide des chambres et une réduction des temps de pressée.



1 -Plateau polypropylène.

2 - Membrane intégrée.

3 - Fluide de compression de la membrane.

4 - Toiles de filtration.

5 -Chambre de filtration.

6 - Introduction de la boue.

Figure 637. Coupe simplifiée de plateau polypropylène à membrane plastique intégrée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 81. Échelle de performances des filtres-presses.

Type de boue	Nature et origine de boue	Conditionnement			Capacité de filtration	Siccité
		$FeCl_3$/MES %	CaO/MES %	Poly-électrolyte $kg.t^{-1}$ MES	MS $kg/m^2.h$	%
Organique hydrophile (MO/MES de 30 à 90 %)	**Urbaine mixte fraîche**					
	1 : % primaire > 75 % des MES	2-4	10-15	–	3-4	40-48
	2 : % primaire = 50 % des MES	4-7	15-22	–	2-3	36-44
	3 : % primaire > 65 % des MES	Éventuell.	–	4-6 (test)	2-3	26-33
	Urbaine mixte digérée					
	1 : % primaire indifférent	Conditionnement thermique			2,5-5	45-60
	2 : % primaire = 50 % des MES	5-8	16-24	–	2-3	36-42
	3 : % primaire > 65 % des MES (boue assez fibreuse)	0-8	–	5-8 (test)	2-3,5	26-33
	Urbaine aération prolongée	6-10	18-28	–	1,5-3	31-37
	Urbaine physico-chimique					
	Traitem. d'eau à plus de 100 $mg.l^{-1}$ en $FeCl_3$	Éventuell.	18-30	–	1,5-2,5	33-45
	Traitem. d'eau à moins de 40 $mg.l^{-1}$ en $FeCl_3$	Éventuell.	–	5-8 (test)	2-3	30-35
	Biologique (fabrique d'acides aminés)	7-13	25-30	–	1,5-2	30-35
Minérale hydrophile (Hydroxydes de Fe, Al, Cr...)	**Décarbonatation partielle**					
	1 : Fe/MES > 10 %		7,5-11		4-6	50-55
	2 : 6 % < Fe/MES < 10 %		–		5-7	55-60
	Clarification d'eau de surface (peu de limons)					
	1 : Sel d'Al		18-35		1,5-2,5	30-38
	2 : Sel de Fe		16-28		1,5-3	34-40
	Ateliers de galvanoplastie		0-15		2-3	30-40
	Anodisation d'aluminium (neutralisation soude)		5-15		3-5	35-40
	Ligne de chromage		15-20		1,5-2,5	28-34
	Décapage sulfurique acier (neutralisation chaux)		–		3-5	45-50
Minérale hydrophobe	**Décarbonatation**					
	1 : Fe/MES < 2 %		–		10-20	60-70
	2 : 2 % < Fe/MES < 5 %		–		7-13	50-60
	Lavage de fumées (neutralisation chaux)		–		8-15	55-60
Huile minérale	**E.R. Laminoirs**		–		10-20	80-85
Huileuse	**E.R. Huiles de coupe ou solubles**					
	1 : cassage acide (neutralisation chaux)		8-12		3	50-60
	2 : flottation (sel Al + chaux) hydrocarbures = 30 % des MES		2-5		3-4	50-55

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

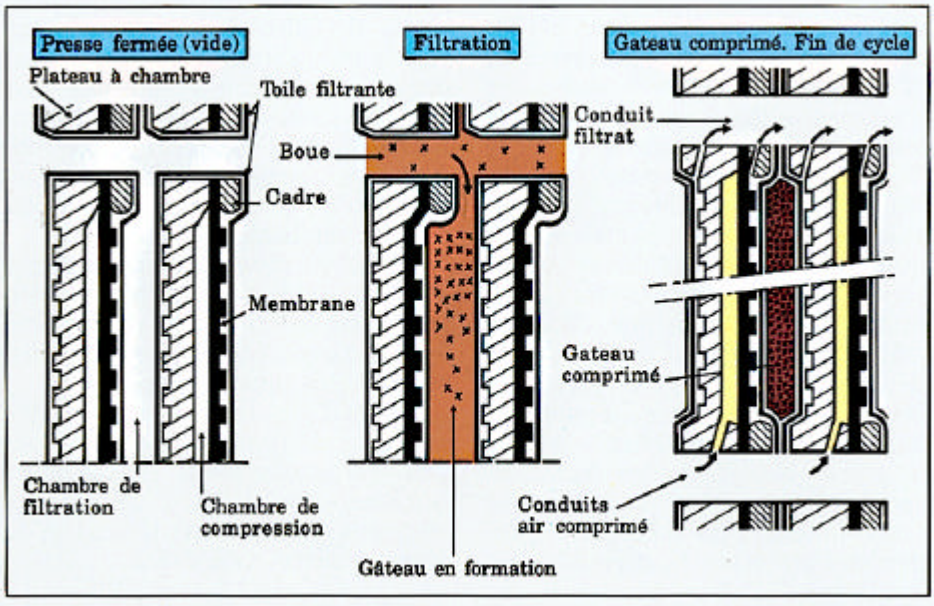


Figure 638. Coupe de plateaux équipés d'une membrane en caoutchouc accrochée sur le plateau.

La durée d'utilisation des **toiles** est très variable, mais 1500 à 2 000 cycles sont régulièrement obtenus dans les ateliers bien entretenus.

La réception des gâteaux s'effectue sous le filtre. Après un premier cassage sur filins d'acier, ils sont évacués en continu par un système trémie-transporteur (transporteurs à courroies ou à chaînes en enceinte close).

Les filtres-presses nécessitent généralement des bâtiments à deux niveaux.

2.4.2. Filtres-presses classiques à plateaux-membranes

Ces filtres-presses ressemblent de extérieur aux filtres classiques. L'une des faces internes de chaque plateau est cependant revêtue d'une membrane plastique (cas de plateau polypropylène à membrane intégrée, voir figure 637) ou d'une membrane en caoutchouc (dans le cas d'accrochage sur le plateau, cette membrane peut être alors démontée et remplacée, voir figure 638). L'autre face de la chambre de filtration est classique rainurage du plateau et toile de filtration. Pour faciliter le débâtissage certains constructeurs (plateaux-membranes polypropylène notamment) proposent des membranes sur les deux faces de la chambre de filtration. La filtration s'effectue d'un seul côté de la chambre ou des deux côtés: la membrane est alors elle-même rainurée et revêtue d'un médium filtrant. Les capacités de production sont bien sûr augmentées avec une filtration des deux côtés de la chambre, et c'est ce procédé qui est maintenant généralement employé pour les filtres-presses à plateaux membranes.

Ce type de filtre présente les avantages suivants:

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- par gonflage (air et parfois eau) de la membrane, la pression est exercée de façon **uniforme sur toute la surface** du gâteau (ce qui ne peut être le cas dans les filtres-presses classiques, où le système de mise en pression par pompage provoque toujours des gradients de pression à l'intérieur de la chambre de filtration). Les siccités sont, de ce fait, améliorées, et les gâteaux obtenus sont plus faciles à débâtir car plus homogènes (élimination des zones humides difficiles à éviter en filtre classique), - l'alimentation en boue du filtre s'effectue jusqu'à 3 ou 4 bars, de préférence avec des pompes à rotor excentré. Les temps de pompage dépendent de la filtrabilité et de la concentration des boues. Lorsque la quantité de boue envoyée dans le filtre est jugée suffisante, le pom

988 page est arrêté et la mise en pression des membranes (7-10 bars) poursuit la déshydratation.

- Ces filtres permettent de mieux s'adapter au conditionnement par polyélectrolyte, avec débâtissage un peu plus aisé; néanmoins, comme pour le filtre classique, des tests industriels préalables sont très recommandés car certaines boues (notamment les boues biologiques colloïdales) ne peuvent être filtrées correctement avec ce conditionnement,

- les capacités de production sont améliorées : de l'ordre de 20 à 40 % par rapport à un filtre classique. Les cycles sont plus courts mais les temps de débâtissage restent toujours de 15 à 20 minutes. Le gain en capacité de filtration n'est cependant pas toujours assuré avec des boues de filtrabilité moyenne et de forte compressibilité (s > 0,7) : cas des boues organiques ayant reçu un conditionnement limité au minimum.

Les installations sont toutefois plus complexes (arrivée indépendante du fluide de mise en pression des membra

nés sur chaque plateau) et souvent plus onéreuses. Ces filtres demandent également plus d'entretien (remplacement périodique des membranes) et il faut que toutes les chambres soient régulièrement et suffisamment remplies à chaque cycle: la présence d'éléments hétérogènes dans la boue est donc à éviter (possibilité de bouchage du conduit d'alimentation des chambres).

Ces filtres à plateaux membranes, très répandus dans les fabrications industrielles, le sont moins pour des boues résiduaires, car une surveillance du débâtissage demeure toujours nécessaire.

Au prix d'une plus grande complexité, certains constructeurs proposent d'autres perfectionnements mécaniques
accrochage des toiles à un système vibrant ou mobile mais le débâtissage de gâteaux collants reste difficile.

2.4.3. Filtres-presses automatiques

Les filtres-presses classiques, même les plus perfectionnés, avec halage mécanisé des plateaux et lavage automatique des toiles, nécessitent toujours la présence d'un opérateur pour surveiller et aider la décharge des gâteaux à raison de 20 à 30 minutes par cycle de 1 à 4 heures.

Des filtres-presses d'un type nouveau, entièrement automatisés, ont donc été développés pourréduire ces frais de main-d'oeuvre.

2.4.3.1. Filtre-presse multicellulaire à plateaux verticaux

Ce sont des filtres à plateaux-membranes. Ils se distinguent des filtres classiques à plateaux-membranes par les deux innovations principales suivantes (figure 639)

- **les plateaux s'écartent tous ensemble** à l'ouverture du filtre, provoquant la décharge simultanée des gâteaux. Les temps morts de débâtissage sont donc

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

très sensiblement réduits (quelques minutes), mais le dispositif de réception des gâteaux doit être prévu en conséquence,

- lorsque le filtre est ouvert, **les toiles filtrantes accrochées à un système mobile sont déroulées** vers le bas, provoquant ainsi l'éjection forcée du gâteau de filtration. En prévision de collage éventuel, un raclage du support filtrant est prévu en bas de chaque plateau. Après le débâtissage, lorsque la toile filtrante se remet en place, un lavage par pulvérisation d'eau moyenne pression peut être effectué.

Grâce au système des plateaux-membranes, l'épaisseur des gâteaux peut être limitée à 10 mm environ, et la durée de filtration est ainsi très réduite: de l'ordre de 10 à 20 minutes.

Ces filtres ont des capacités de production ($kg/m^2.h.$) de 5 à 10 fois supérieures à celles des filtres classiques. Toutefois, le très sérieux handicap de ces appareils est le coût d'investissement, de 2 à 3 fois plus élevé que celui d'une installation classique. De plus, certaines contraintes d'exploitation subsistent

- importance du suivi et de l'entretien d'un ensemble mécanique complexe membranes, organes de mise en rotation des supports filtrants, circuits de mise en pression et dépression des membranes, systèmes mobiles d'introduction des boues dans les chambres, etc.,

-système réservé à des boues très bien conditionnées et ne comportant pas de matériaux hétérogènes grossiers (filasses, etc.). En effet, l'inconvénient principal de ces filtres réside dans les faibles passages prévus pour l'introduction des boues dans les chambres de filtration. Il vaut mieux réserver ces filtres à des boues composées de particules homogènes et fines, du type boues de clarification chaulées (hydroxydes) ou boues de décarbonatation.

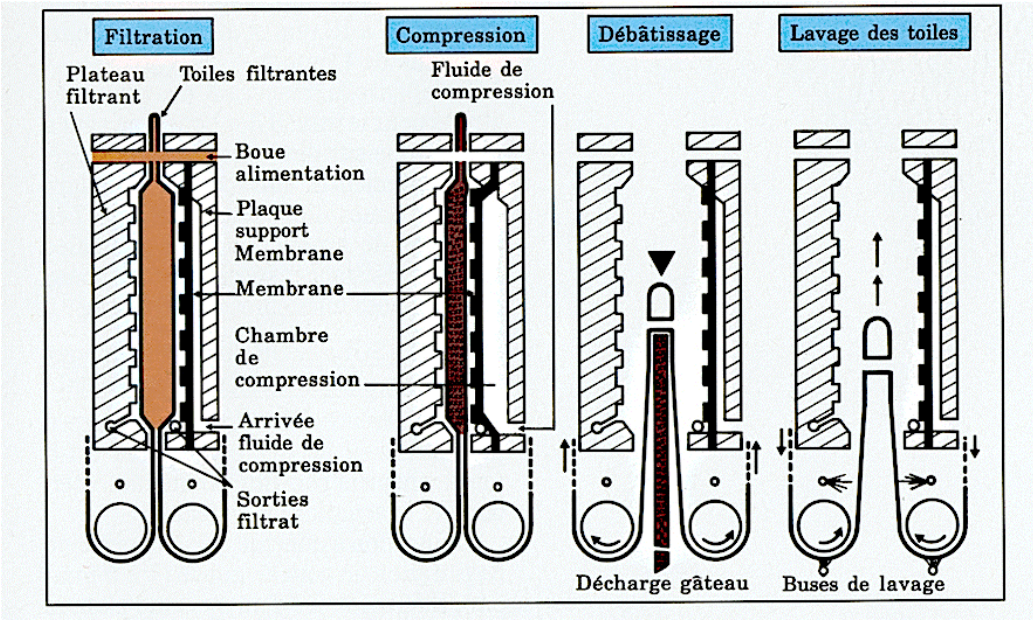


Figure 639. Schéma de principe d'un filtre-presse multicellulaire automatique à plateaux verticaux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 640. Filtre-presse automatique à tambour FALC. Surface: 4 m^2

Lorsque toutes les précautions précédentes sont prises, ces filtres automatiques peuvent fonctionner sans présence de personnel, avec production de gâteaux de bonne siccité.

2.4.3.2. Filtre-presse multicellulaire à tambour

Une toile filtrante est enroulée autour d'un tambour percé d'orifices d'alimentation en boue. Des cellules filtrantes (avec ou sans membrane) retenues par une enveloppe fixe extérieure au tambour, sont appliquées (par vessie) sur la toile, constituant ainsi des chambres de filtration étanches. A chacune de celles-ci correspond un des orifices alimentés, à travers un distributeur rotatif, par la pompe à boue haute pression (figure 640)

Le debâtissage est assuré par mise en rotation du tambour et déroulement de la toile.

Dans la partie basse de l'appareil, la toile s'écarte du tambour pour être raclée et lavée.

Les capacités de production sont 6 à 10 fois supérieures à celles d'un filtre classique: filtration rapide en couche mince de 3 à 10 mm et débâtissage court en moins de 1 minute.

Ces appareils, réservant des passages étroits pour le transit des boues, ne sont à utiliser que sur des boues fines homogènes : traitement de surface, boues de clarification, boues de décarbonatation... Les capacités de production sont optimales avec des résis tances spécifiques des boues conditionnées inférieures à 3.10^{11} $m.kg^{-1}$..

2.4.3.3. Le SQUEEZOR : filtre-presse monocellulaire à plateau-membrane horizontal

A la différence des autres filtres-presses précédemment décrits, cet appareil est à fonctionnement **continu:** alimentation en boue et évacuation du gâteau.

La filtration s'effectue selon le principe de filtration en couche mince (3 à 6 mm) par l'intermédiaire d'un système plateau et membrane.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

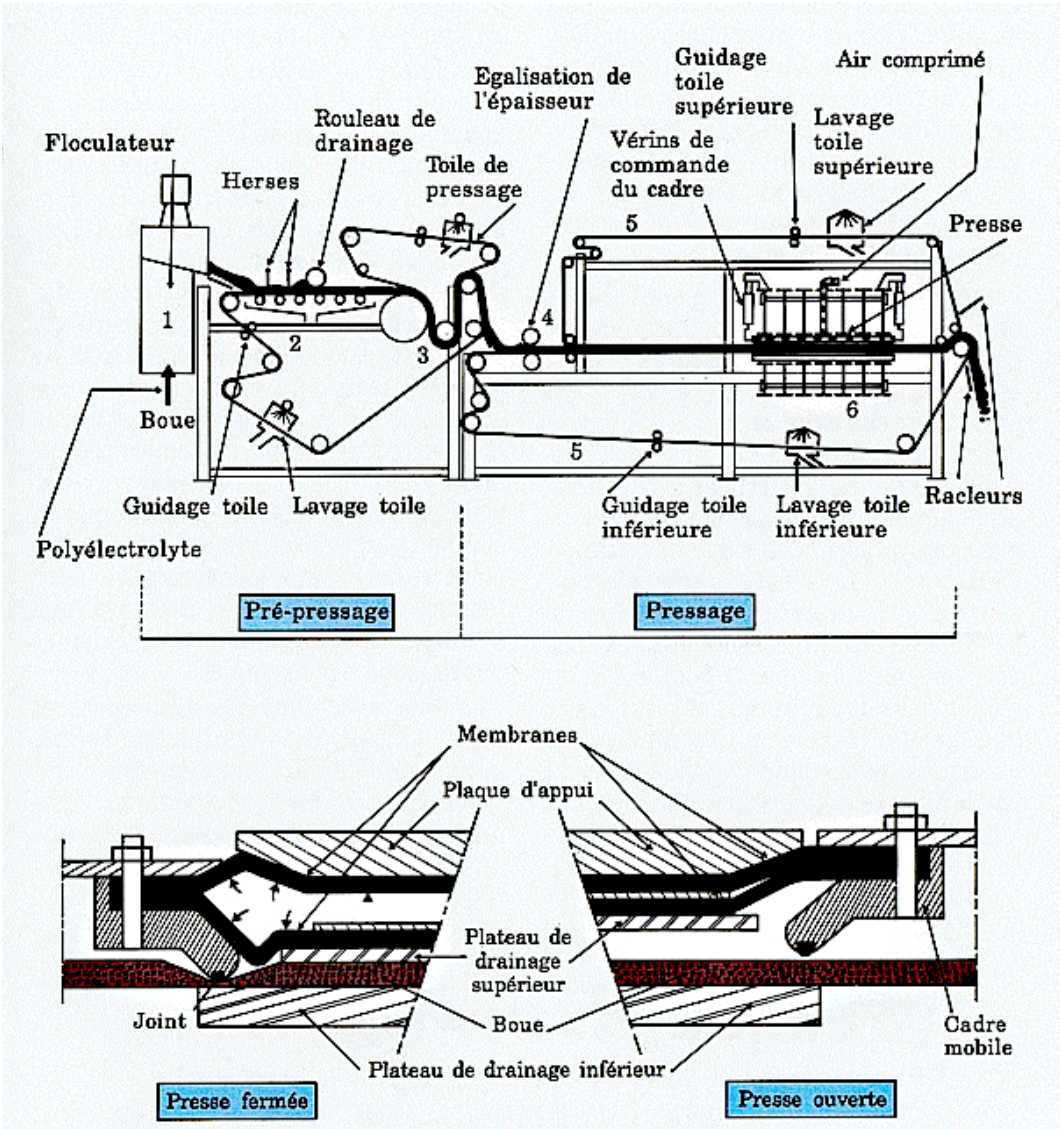


Figure 641. Coupe SQUEEZOR avec prépressage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'appareil comprend (figure 641)

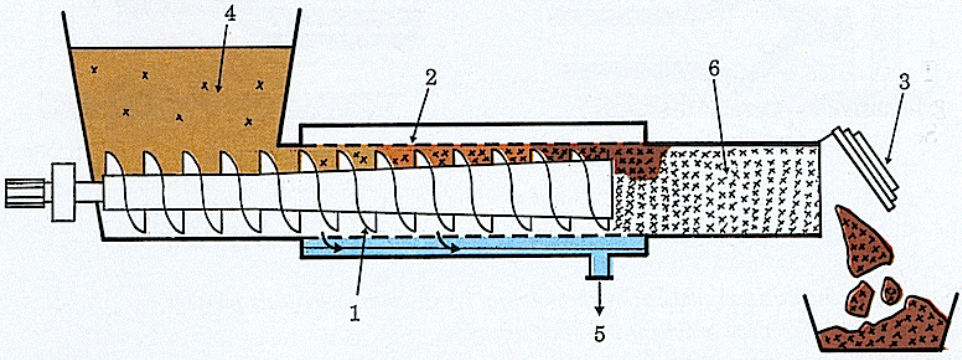
- **une première partie,** correspondant à un filtre à bandes presseuses simplifié (page 1007) : les boues sont conditionnées au polyélectrolyte (1), égouttées en zone de drainage (2) et pré-pressées dans la zone d'enroulement (3). La boue pénètre (4), partiellement déshydratée, en zone de pressée. La capacité de production est ainsi améliorée,

une deuxième partie, assimilable à une chambre étanche de filtration: le gâteau, uniformément réparti en couche mince entre deux toiles filtrantes (5), est pressé sur ses deux faces par l'intermédiaire de deux plateaux filtrants: l'inférieur fixe sur le plan vertical, le supérieur actionné verticalement par des vérins Pour assurer une évacuation continue du gâteau déshydraté, l'ensemble de la presse (6) est mobile et avance avec les toiles; en bout de course à la fin d'une phase de filtration, la presse libère une "galette" et revient très rapidement en arrière, pour venir s'appliquer sur la partie amont des toiles où a été déposée la boue pré-déshydratée pendant la période de filtration précédente. La cinématique du système est réglée de façon à ce qu'il y ait juxtaposition des galettes pressées.

Du fait de la décharge en continu des gâteaux, du fort pré-épaississement avant pressage, et de la faible épaisseur du gâteau, les capacités de production sont 15 à 20 fois supérieures à celles d'un filtre-presse classique. Par suite de l'alimentation à large section de la zone de pressée, cet appareil peut traiter des types de boues très variés, un dégrillage de sécurité est toutefois recommandé. De plus, les temps de pressage étant très courts (de 1 à 2 minutes), il faut mieux réserver cet appareil à des boues présentant, après conditionnement par polyélectrolyte, de faibles coefficients de compressibilité ($s < 0,7$) et des siccités limites supérieures à 35 % (boues organiques à texture fibreuse, boues urbaines peu hydrophiles, boues minérales à tendance hydrophobe par exemple).

Comme avec tous les filtres-presses automatiques, des contraintes spécifiques d'entretien doivent être respectées.

Une variante intéressante de ce filtre, prévoyant un module de pressage formé



1 – Screw press.
2 – Strainer.
3 – Adjustable shutter.
4 – Liquid or consistent sludge.
5 – Filtrate.
6 – Plug of dewatered sludge.

Figure 642. Schematic section of a screw press.

1 - Vis presseuse.
2 - Tamis.
3 - Obturateur réglable.
4 - Boue liquide ou pâteuse.
5 - Filtrat.
6 - Bouchon de boue déshydratée.

Figure 642. Coupe schématique d'une presse à vis.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 643. Installation de VIC-LE-COMTE (Puy-de-Dôme) pour la Banque de France. Capacité: 1500 kg de MS h^{-1}. 2 presses à vis Ø 600

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de plusieurs plateaux-membranes verticaux, permet d'augmenter temps de compression ou capacité de production.

2.4.4. Autres presses

les presses à vis

Ces appareils ne permettent d'essorer convenablement que des boues très fibreuses.

Ils sont constitués d'une vis (simple ou double) qui tourne lentement (quelques tours/minute), dans un cylindre perforé à large maille en comprimant la boue (figure 642). Cette compression est rendue possible en limitant la sortie du "boudin" par formation d'un bouchon de boue déshydratée en sortie de vis. Les forces nécessaires pour pousser ce bouchon sont importantes, et la boue est donc soumise à de fortes pressions (parmi les plus fortes des systèmes de déshydratation mécanique), et à des contraintes élevées de cisaillement (favorables à l'expulsion de l'eau interstitielle). La formation du 'bouchon" est facilitée par la réduction du passage en sortie de vis (en général par un obturateur réglable).

Dans la principale application de ces presses, sur les boues primaires de papeterie contenant plus de 50 % de fibres, des siccités de 40 à 55 % sont obtenues. Un appareil de pré-égouttage (GDE ou vis) permet d'augmenter les capacités massiques de l'appareil: 200 à 400 $kg.h^{-1}$ de MES pour une presse de diamètre de bol 300 mm et 600 à 1000 $kg.h^{-1}$ pour un bol de 650 mm. Comparativement aux filtres à bandes, les consommations de polyélectrolyte sont plus élevées car le floc doit être très résistant.

L'entretien normal de ces matériels est lié aux phénomènes d'usure de la vis et du tamis. Leur construction prend en compte les fortes contraintes exercées.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.5. FILTRES A BANDES PRESSEUSES

La taille des flocs obtenus par conditionnement aux polyélectrolytes (p. 953) a rendu possible le développement d'appareils de déshydratation spécifiquement adaptés au traitement des boues résiduaires: les **filtres à bandes presseuses**.

Ces filtres sont très répandus pour plusieurs raisons

- **grande facilité d'exploitation** et bon contrôle visuel de la boue en cours de déshydratation,
- faible coût d'exploitation et investissement modéré,
- **continuité du procédé** et du lavage. des bandes filtrantes,
- simplicité de la mécanique,
- ajout de charge minérale en général inutile (parfois de sciure ou de cendres sur certaines boues huileuses par exemple),
- production de boues pelletables,

Ces filtres permettent d'optimiser l'investissement en fonction de l'aptitude à la déshydratation de la boue. Par ailleurs, ils représentent un procédé quasi universel et le moins énergivore

filtre à bande: 10-25 kWh.t^{-1} de MES,
filtre-presse classique 20-40 kWh.t^{-1} de MES,
centrifugeuse: 30-60 kWh.t^{-1} de MES,
filtre sous vide: 50-150 kWh.t^{-1} de MES

2.5.1. Principe dé filtration

Le processus de filtration comporte toujours les étapes suivantes

- **floculation avec des polyélectrolytes**, dans des floculateurs à court temps de séjour, ou quelquefois en conduite,
- **drainage** de la boue floculée : égouttage, sur un support filtrant, de l'eau interstitielle libérée. Ceci provoque l'épaississement rapide de la boue; pour obtenir les meilleures performances, la boue drainée doit être la plus concentrée possible,
- **pressage** de la boue drainée: celle-ci, de consistance suffisante, est alors emprisonnée entre deux toiles filtrantes qui forment un coin et la compriment **progressivement** Le "sandwich" formé s'enroule alors successivement autour de tambours perforés, puis de rouleaux disposés en quinconce, suivant un parcours qui varie selon le type de filtre.

L'efficacité de la déshydratation dépend de la **pression effective** P_e appliquée sur le sandwich de boue et aussi du temps de **pressage**

De façon simplifiée, la pression P_e, dite pression de surface, est de la forme

$$P_e = k\frac{2T}{LD}$$

avec T : effort de tension de la toile,
L: largeur de la toile,
D : diamètre du rouleau.

P_e est donc obtenue par la tension des toiles

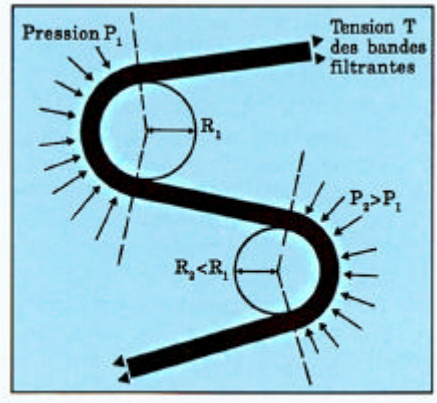


Figure 644. Filtre à bandes presseuses : surface active de pressage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

autour des rouleaux. Elle reste modérée (0,3 à 1 bar) du fait de la résistance mécanique des bandes filtrantes et des rouleaux. P_e est d'autant plus forte que le diamètre du rouleau est faible.

Le temps de pressage dépend de la surface active de pressée aux enroulements (voir figure 644) et de la vitesse de déroulement.

Le départ de l'eau est facilité par les contraintes de **cisaillement** de la boue au passage des rouleaux et peut s'effectuer alternativement, d'un côté, puis de l'autre du "tapis" de boue.

Dans les filtres à bandes presseuses, le **pressage s'effectue dans une enceinte ouverte:** le sandwich de boue assure donc lui-même l'étanchéité latérale sous la pression qu'il peut supporter lors de sa progression; si la pression est trop forte, la cohésion du tapis de boue est détruite et il y a **fluage**, avec éjection latérale, hors de l'espace de filtration, de boues partiellement déshydratées.

La pression provoquant le fluage dépend bien évidemment de la structure physique des boues drainées. Les siccités obtenues sur filtre à bandes presseuses sont donc inférieures à celles obtenues sur filtre à chambres étanches (filtre-presse).

Pour les améliorer, deux possibilités existent

- multiplier le nombre des enroulements et diminuer le diamètre des rouleaux dans la partie finale de filtration (dans la limite de résistance mécanique),
- faire appel à des systèmes de compression extérieurs, indépendants de la tension des toiles.

Cependant, ces dispositifs complémentaires ne sont utilisables que sur des boues à forte cohésion, fibreuses par exemple. En effet, des boues plus colloïdales ne résisteraient pas à cette compression supplémentaire ou ne permettraient qu'un gain minime de siccité.

Les filtres à bandes classiques permettent d'obtenir des résultats satisfaisants sur la grande majorité de boues organiques ou d'hydroxydes, car les siccités obtenues sont alors déjà très proches des siccités limites.

2.5.2. Les filtres SUPERPRESSDEG

Selon le but recherché et la qualité des boues à déshydrater, plusieurs filtres sont disponibles.

2.5.2.1. SUPERPRESS ST

Cette version standard permet d'obtenir des résultats optimaux sur un grand nombre de boues. Elle est de ce fait la plus utilisée.

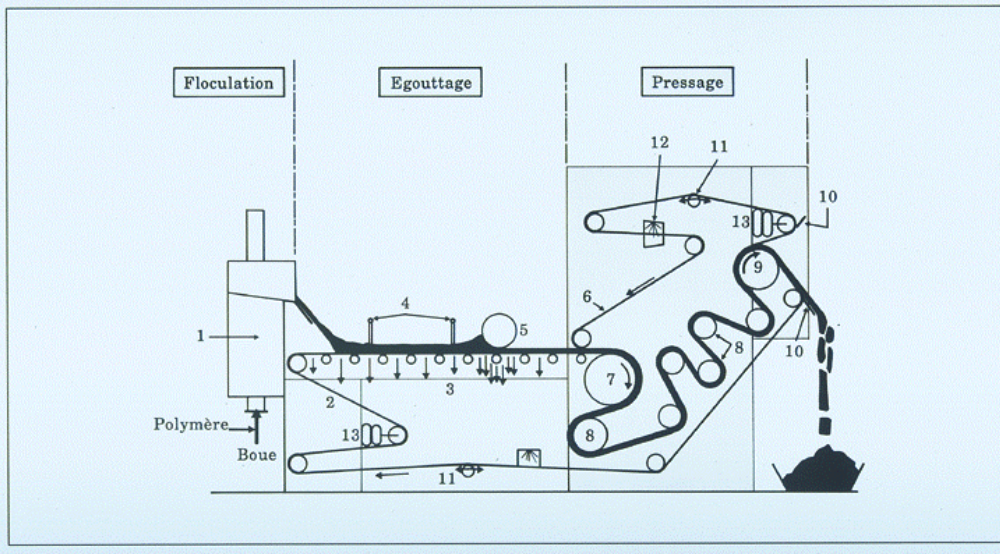
La figure 645 montre une coupe schématique de l'appareil

- la boue est introduite avec le floculant dans un **mélangeur** (1) équipé d'un agitateur à vitesse variable. La boue floculée se déverse sur une toile (2) dans la **zone d'égouttage** (3). La boue est uniformément répartie sur toute la largeur du filtre par l'intermédiaire de bandes caoutchouc empêchant un drainage trop rapide et favorisant donc l'étalement de boues liquides.

Dans cette zone d'égouttage, le tapis de boue est **hersé** (4), et ensuite réparti en couche régulière et homogène par un rouleau (5) dit **rouleau de drainage**. Ce rouleau permet

- d'introduire en zone de pressée un tapis régulier de boue (épaisseur variable de 10 à 40 mm selon positionnement préfixé par l'opérateur),
- et surtout d'effectuer un **premier compactage** de la boue, de façon à limiter le fluage en début de pressage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Mélangeur.
2 - Toile inférieure.
3 - Zone d'égouttage.
4 - Herse.
5 - Rouleau de drainage.
6 - Toile supérieure.
7 - Tambour perforé.
8 - Rouleaux de renvoi.
9 - Rouleau d'entraînement.
10 - Racloirs.
11 - Rouleau de centrage.
12 - Enceinte de lavage.
13 - Vérins pneumatiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La boue est ensuite prise entre les toiles inférieure (2) et supérieure (6) et soumise à un premier pressage modéré autour d'un **tambour perforé** de grand diamètre (7). Les deux toiles, entraînées de façon continue, passent ensuite sur une série de **rouleaux de renvoi** (8), de diamètres décroissants, permettant la mise en pression **progressive de la boue**. Le nombre d'enroulements est choisi de façon que la déshydratation soit presque terminée avant l'attaque du dernier rouleau.

En sortie, les deux toiles se séparent, après passage sur le rouleau d'entraînement (9), et le gâteau est dégagé par deux racloirs (10) pour évacuation par bande transporteuse ou par pompe gaveuse.

Le centrage automatique de chacune des toiles est assuré par un rouleau à déplacement angulaire, à commande pneumatique (11).

Les deux toiles, à larges mailles, sont lavées en continu dans des enceintes fermées (12) au moyen de rampes de pulvérisation d'eau sous pression (4-6 bars).

Des réglages simples permettent d'adapter le fonctionnement du filtre aux caractéristiques des boues

- tension des toiles par vérins pneumatiques (13) à pression réglable,
- vitesse d'entraînement des toiles modulable de 1 à 4 $m.min^{-1}$.
- énergie de floculation adaptable par modification de la vitesse de l'agitateur du floculateur,
- ajustement de la hauteur du tapis de boue à l'entrée du pressage.

Le châssis du filtre SUPERPRESS est étudié de façon à permettre

- une bonne visualisation de la zone de drainage,
- une accessibilité aisée aux organes mécaniques. Des largeurs de bande possibles de 1,2 ou 3 m autorisent une grande latitude dans le dimensionnement d'ateliers de traitement des boues.

Figure 646. Superpress ST3. Width: 3 m.

Figure 646. SUPERPRESS ST3. Largeur: 3 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.5.2.2. SUPERPRESS SP et SPI

Les dispositions de base restent identiques à celles de la version ST. Une protection anticorrosion accrue permet de réduire les coûts d'entretien, dans le cas de traitements de certaines boues corrosives.

Les rouleaux de pressage sont caoutchoutés et de nombreux éléments sont réalisés en acier inoxydable: floculateur, auges, laveurs, tambour perforé, rouleau de drainage...

Le renforcement du dispositif d'entraînement permet d'accepter des boues à forte cohésion, conduisant à des efforts de pressage élevés (boues de papeterie très fibreuses et certaines boues minérales).

La version SPI comporte un châssis en **acier inoxydable**.

2.5.2.3. SUPERPRESS SL (voir figure 649)

Cette appareil (largeur 1 m) est une version **simplifiée** de la version ST qui permet de diminuer l'investissement Il comprend un nombre plus restreint d'enroulements. Lorsque ce filtre est utilisé sur des boues colloïdales de faible siccité limite (boue d'aération prolongée par exemple), la réduction du temps de pressage n'a qu'une faible influence sur les siccités du gâteau (perte de 1 à 3 points par rapport à la version ST).

Toutefois, les débits massiques linéaires de ces filtres sont souvent légèrement réduits. La qualité de construction des versions ST ou SP est conservée.

2.5.2.4. SUPERPRESS HD

Le filtre HD permet d'assurer de hautes performances sur des boues à forte cohésion, dans des conditions industrielles sévères; sa grande robustesse est spécialement adaptée aux fortes contraintes mécaniques développées.

Il répond bien au cas de boues à faible coefficient de compressibilité et à forte siccité limite (mines, chimie, papeterie...). Il peut être aussi utilisé sur d'autres boues (par exemple boues urbaines à tendance fibreuse) pour accroître les capacités de filtration et (ou) se rapprocher de la siccité limite des boues. Par contre, les gains en siccité, sur des boues d'origine essentiellement biologique, sont modestes et justifient difficilement le surcroît d'investissement

Le **SUPERPRESS HD** (voir figure 650) diffère de la version standard ST par

- **la construction**

- châssis plus lourd,
- entraînement des toiles adapté,
- paliers à semelles, à double rangée de rouleaux pour supporter plus longtemps les plus gros efforts engendrés dans les enroulements,
- conception anticorrosion identique à la série SP,
- pression appliquée sur la boue 3 à 5 fois supérieure.

- **le procédé**

- surface active de pressage plus de trois fois supérieure,
- mise en pression très progressive de la boue,
- vitesse de toiles plus élevée (jusqu'à 6 $m.min^{-1}$), permettant d'augmenter les débits massiques,
- module de laminage en sortie d'appareil, permettant le gain de plusieurs points de siccité, grâce à de plus fortes pressions.

Le module de laminage du SUPERPRESS HD comprend trois rouleaux d'écrasement disposés sur deux rouleaux de gros diamètre (voir figure 652).

Le gâteau, déjà bien déshydraté, subit une compression supplémentaire par passage entre des rouleaux qui se font face et dont l'écartement est plus faible que l'épaisseur initiale du gâteau (voir figure 653).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

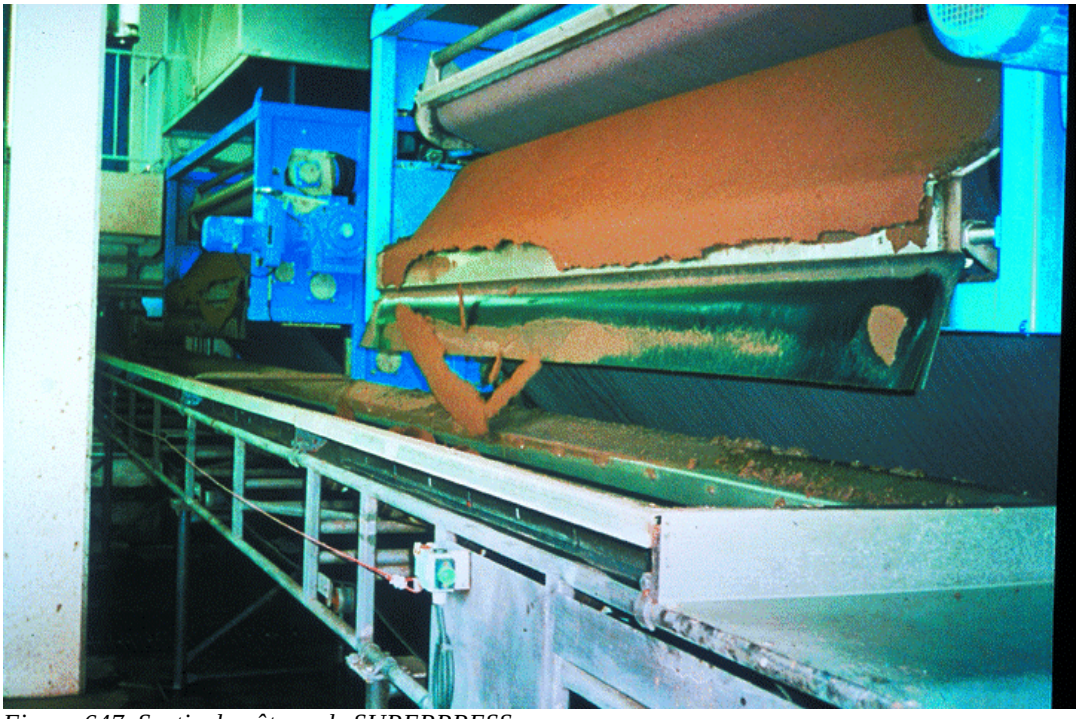
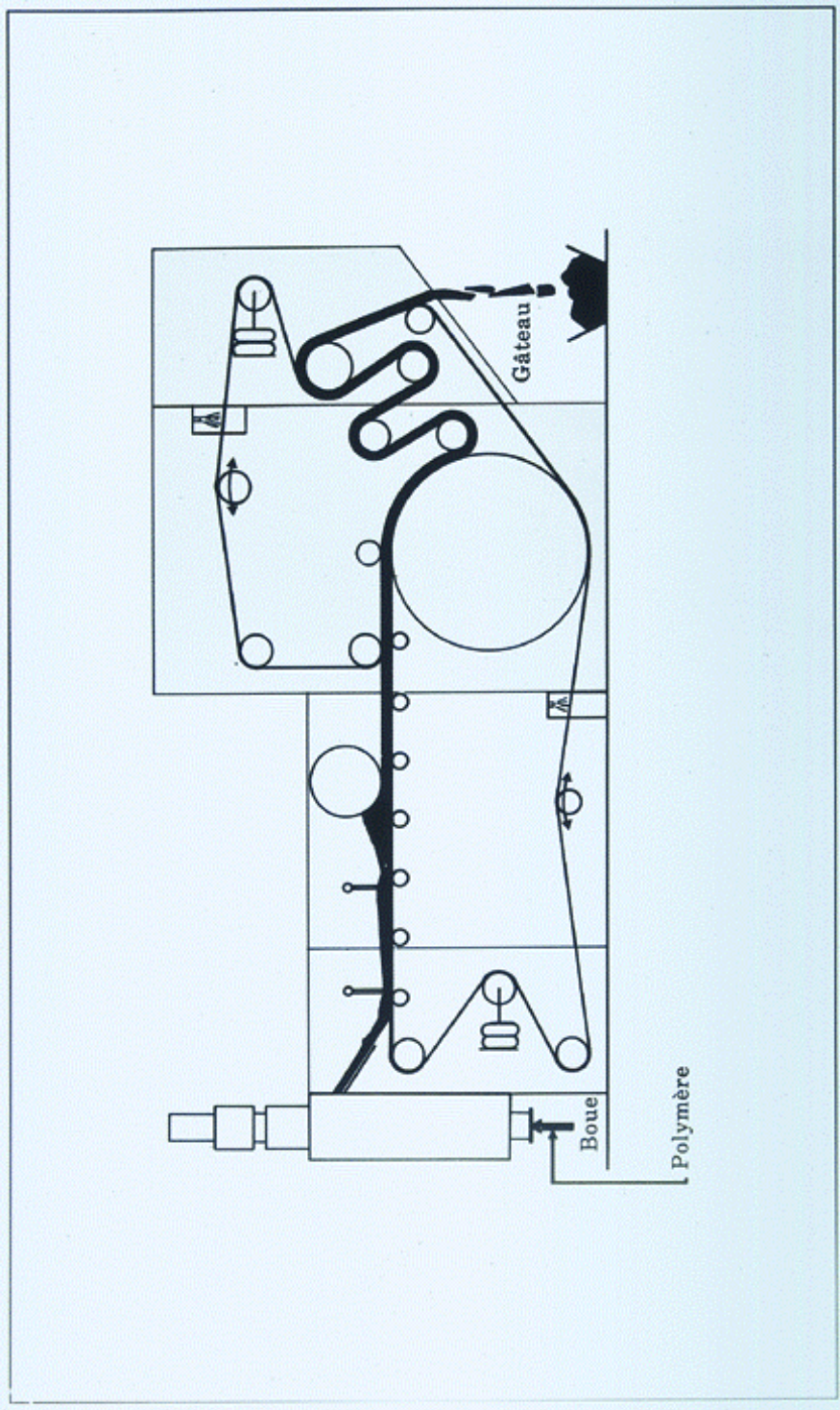


Figure 647. Sortie de gâteau de SUPERPRESS.

Figure 648. SUPERPRESS SP.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



Coupe SUPERPRESS SL.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

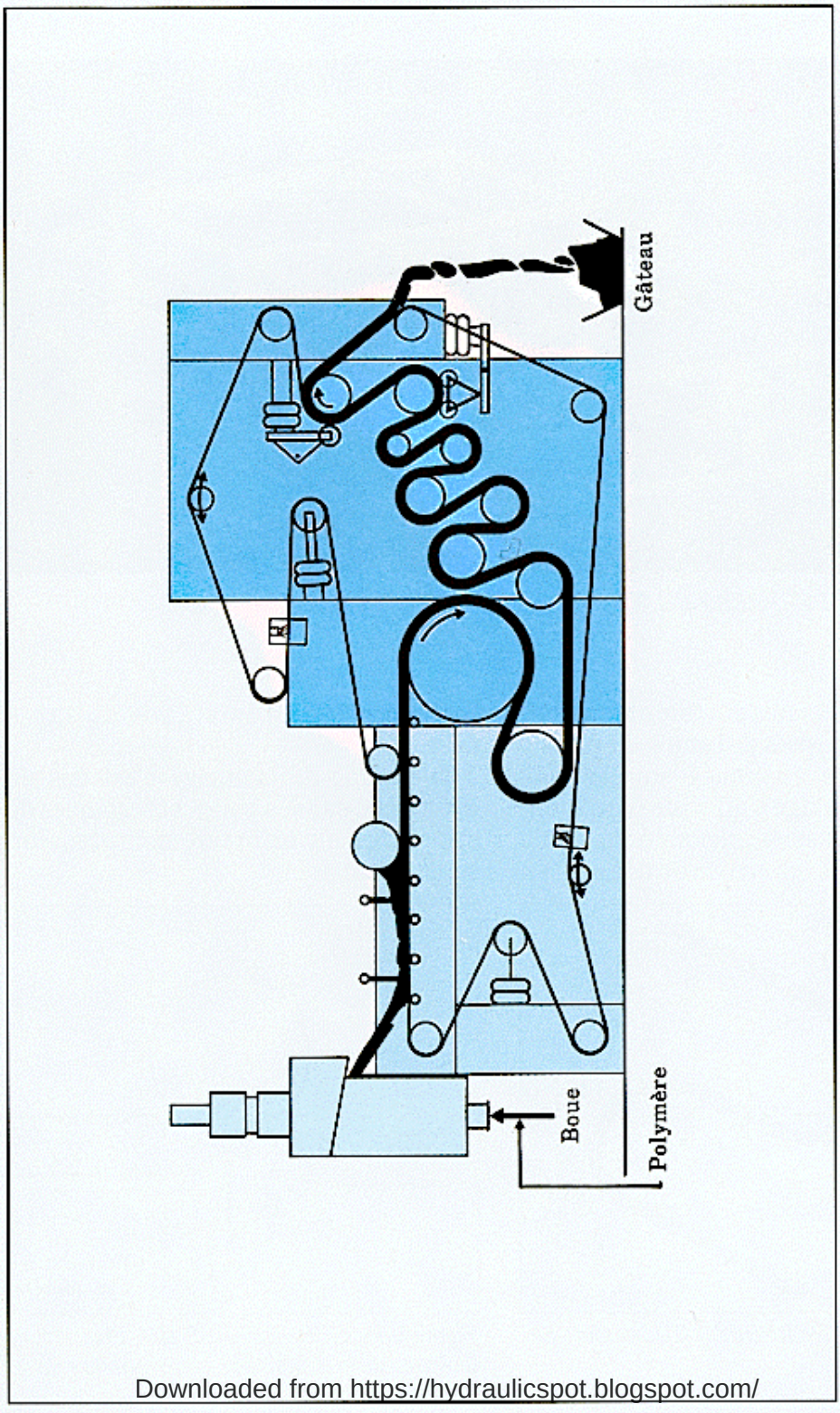


Figure 650. Schéma de principe du SUPERPRESS HD.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

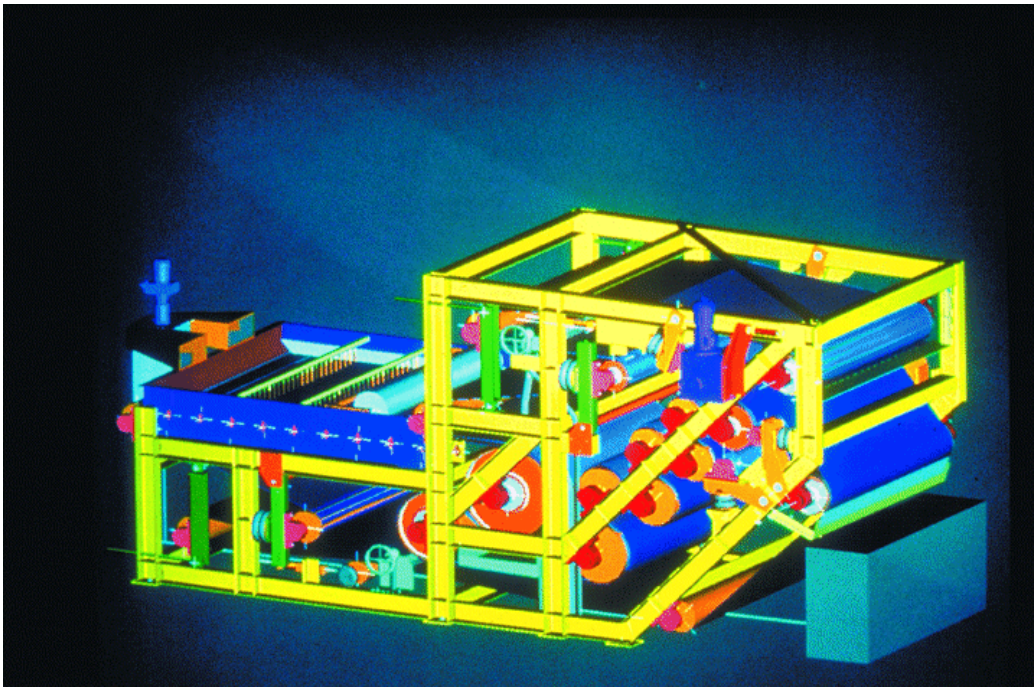


Figure 651. SUPERPRESS HD. Vue d'ensemble en CAO 3 dimensions.

Le départ de l'eau s'effectue alternativement d'un côté, puis de l'autre, du gâteau.

La pression appliquée sur les rouleaux de laminage s'effectue par l'intermédiaire de vessies pneumatiques. Elle est donc aisément modulable en fonction de la résistance du tapis de boue.

Ce module de laminage n'est mis en oeuvre que sur des boues susceptibles de supporter un effort de compression supplémentaire.

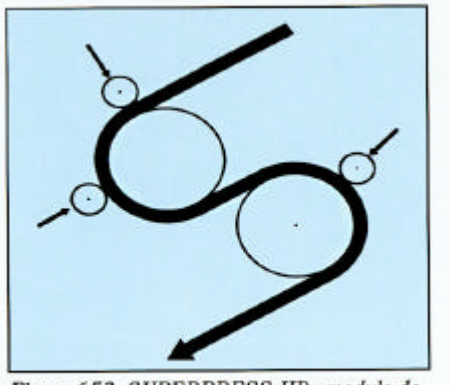


Figure 652. SUPERPRESS HD : module de laminage.

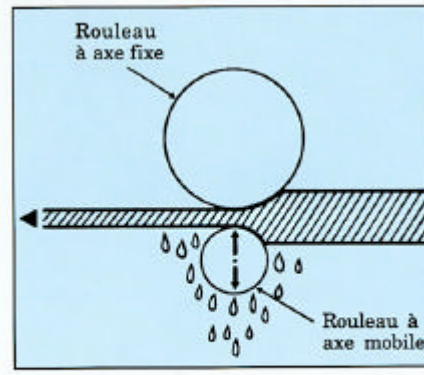


Figure 653. SUPERPRESS HD. Pression linéaire sur le gâteau par l'intermédiaire de deux rouleaux en vis-à-vis.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.5.2.5. Performances des SUPERPRESSDEG

Il n'existe, pour ce système, aucune relation mathématique définissant la capacité de production. Le dimensionnement découle le plus souvent de l'expérience acquise sur des boues similaires, complétée par quelques tests simples de laboratoire pour connaître

vitesse de drainage, siccité après drainage, résistance au fluage, siccité après pressage. Des essais sur pilote industriel permettent d'affiner les prévisions. Les capacités de production des filtres à bandes presseuses sont données en kg de matières sèches extraites par m de largeur de bande et par heure. Dans la pratique, on utilise aussi la notion de débit d'alimentation exprimé en m^3 par m de largeur de bande et par heure.

Le tableau 82 fait apparaître la grande diversité des performances (débits et surtout siccités) rencontrées avec les principales familles de boues.

Tableau 82. **Performances des SUPERPRESSDEG.**

Type de boue	Nature et origine de boue	Concentration de la boue MES $g.l^{-1}$	Type Superpressdeg	Capacité MS kg/m.h	Siccité % MS	Polyélectrolyte $kg.t^{-1}$ MES
Organique hydrophile	Urbaine primaire digérée (MV $\leq$ 50 % des MES)	60 – 90	Standard ST ou SP	400 – 500 500 – 700	30 – 35 28 – 32	1,5 – 3
			HD	600 – 800	34 – 38	
	Urbaine fraîche mixte % primaire $\geq$ 65 % des MES (boue fibreuse)	50 – 60	ST ou SP	250 – 400 400 – 500	25 – 31 23 – 28	3,5 – 5,5
			HD	400 – 550	26 – 33	
	Urbaine fraîche mixte % primaire = 50 % des MES	35 – 45	ST ou SP	150 – 300 250 – 400	20 – 26 18 – 23	4 – 6
	Urbaine mixte digérée % primaire = 50 % des MES	20 – 30	ST ou SP	120 – 250 200 – 300	19 – 24 17 – 22	5 – 6
	Urbaine aération prolongée	18 – 25	ST ou SP	100 – 150 150 – 250	16 – 21 14 – 19	4 – 7
			SL	80 – 130	14 – 19	
	Urbaine physico-chimique Dosage $FeCl_3$ $\leq$ 50 $mg.l^{-1}$	60 – 80	ST ou SP	300 – 450 400 – 700	29 – 35 26 – 32	2 – 4
			HD	400 – 700	30 – 35	
	Boue biologique faible charge (industrie textile chim.)	25 – 40	ST/SP	80 – 150	15 – 20	4 – 7

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 82 (suite)

Type de boue	Nature et origine de boue	Concentration de la boue MES $g.l^{-1}$	Type Superpressdeg	Capacité MS kg/m.h	Siccité % MS	Polyélectrolyte $kg.t^{-1}$ MES
Organique hydrophile	Laiterie aération prolongée	20 – 25	ST SL	80 – 120 70 – 110	12 – 16 12 – 15	4 – 7
Fibreuse	Fabrique de pâte chimique (fibres > 80 % des MES)	30 – 40	SP/ST	250 – 350 350 – 450	23 – 30 21 – 26	0,5 – 2
			HD	350 – 550	25 – 32	
	Papeterie (fibres = 20 % des MES)	80 – 150	SP/ST	400 – 700 600 – 800	40 – 52 35 – 44	0,3 – 1,2
			HD	600 – 1000	43 – 54	
	Papeterie (fibres = 60 % des MES)	40 – 60	SP/ST	300 – 450 450 – 600	29 – 37 26 – 33	1 – 3
			HD	450 – 650	32 – 42	
Minérale hydrophobe	Lavage de gaz sidérurgie	150 – 250	HD	1200 – 2000	50 – 68	0,3 – 1,5
			SP	800 – 1200	45 – 60	
	Décarbonatation 90% $CaCO_3$, Fer < 2%	400 – 800	SP/ST	1000 – 2500	55 – 65	0,2 – 1
			HD	1800 – 3000	65 – 70	
	Décarbonatation partielle $CaCO_3$ = 65 % des MES Fer = 5 à 10 % des MES	100 – 120	SP/ST	350 – 500	30 – 38	1 – 2
			HD	500 – 600	34 – 42	
Minérale hydrophile	Clarification eaux très peu chargées Hydroxydes d'Al = 40 – 50 % des MES	20 – 30	ST	100 – 130	16 – 20	2 – 3
			SL	80 – 100	15 – 19	
	Clarification rivière argileuse par DENSADEG MES d'EB = 50 – 100 $mg.l^{-1}$ Hydroxydes Al = 20 % des MES	50 – 60	ST/SP	300 – 450	21 – 27	3 – 4
	Traitement de surface Ligne de chromage	20	SP/ST	100 – 140	18 – 24	2 à 3 + chaux éventuellement

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les débits traités par les filtres ST ou SP sont généralement compris entre 6 et 8 m^3/m.h. Avec des boues fibreuses ils peuvent atteindre 10 à 15 m^3/m.h.

2.5.2.6. Amélioration des capacités des SUPERPRESSDEG : préégouttage

La mise en place d'un pré-égouttage supplémentaire, GDE par exemple, (p. 929) en amont de la zone de drainage du SUPERPRESSDEG permet

- d'augmenter les débits: par exemple avec des boues urbaines de bonne cohésion: 10 à 13 m^3/m. h. Avec des boues de papeterie peu concentrées: 20 à 30 m^3/m.h,
- de conserver des débits massiques suffisants dans le cas de boues organiques peu concentrées. Le pré-égouttage par grille GDE permet d'alimenter le filtre avec des boues à 10 -15 $g.l^{-1}$ et de les soutirer ainsi directement de la recirculation d'un système de boues activées. Ceci permet de traiter des boues non fermentées, d'obtenir donc de meilleures siccités, et de supprimer les silos concentrateurs.

Le système GDE est alors, dans cette application, intégré dans le bâti du SUPERPRESSDEG (figure 654 et 655).

Le système GDE est préférable à un allongement de la longueur de drainage de filtre: le raclage en continu du support filtrant permet en effet d'éviter le ralentissement du drainage à travers un tapis de boue.

2.5.2.7. Mise en oeuvre des SUPERPRESSDEG

L'installation de conditionnement (injection du polymère en conduite) est très simple (p. 958). La mise en place de (appareil nécessite un bâtiment de surface réduite et d'un seul niveau. Pour des facilités d'exploitation et d'entretien, un atelier de filtre à bandes presseuses doit être bien ventilé. Les SUPERPRESSDEG peuvent être équipés d'une hotte aspirante, couvrant tout le dessus de l'appareil.

- **Exploitation**

Le maintien d'un bourrelet de boue en amont du rouleau de drainage (figure 645)

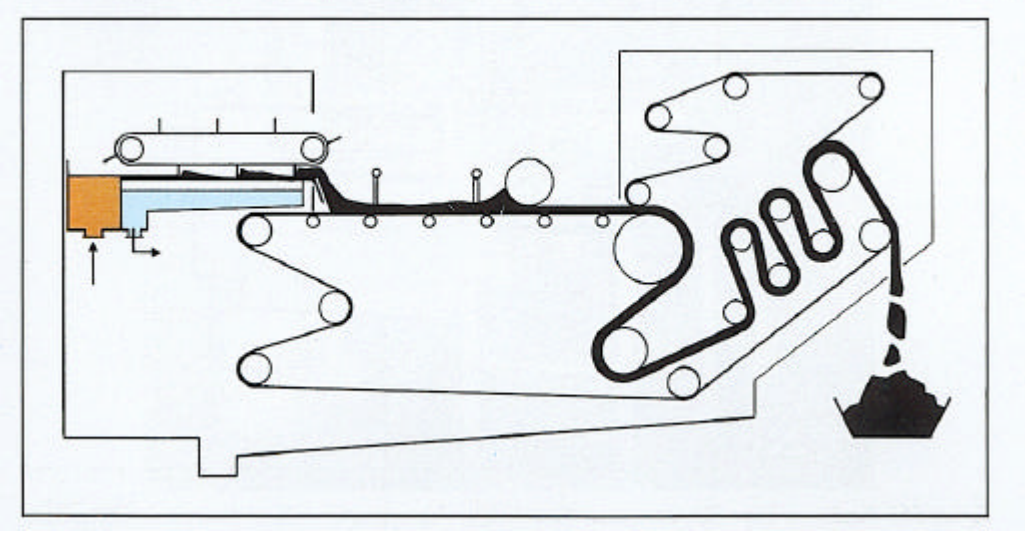


Figure 654. Schéma de principe du SUPERPRESSDEG avec GDE intégrée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

permet d'obtenir par trituration une évacuation maximale de l'eau interstitielle.

Le filtre doit fonctionner sans fluage latéral: on agit, pour cela, sur le dosage du polyélectrolyte, sur l'épaisseur du gâteau en entrée presse, et sur la tension, ou la vitesse, des toiles.

Le taux de capture est maximal lorsque le gâteau se décolle bien des toiles en sortie de filtre.

Avec un filtre à bandes presseuses, il y a toujours recherche d'un compromis entre siccité et débit massique, comme le montrent les exemples du tableau 82

- pour la recherche du **débit maximal,** il faut accélérer le défilement des toiles, augmenter (dans la limite du fluage) l'épaisseur du tapis de boue en entrée presse (action aisée sur le rouleau de drainage) et, éventuellement, augmenter le dosage de polymère et baisser la tension des bandes filtrantes,
- pour la recherche d'une **siccité maximale,** il faut réduire le plus possible la vitesse des toiles et, dans les limites permises, augmenter la pression dans les vessies pneumatiques de tension des toiles.

2.5.2.8. Fonctionnement des SUPERPRESSDEG sans surveillance

Il est permis par une autorégulation du filtre à partir des données (TOR) de trois capteurs simples. Le but de cet automatisme est de limiter le plus possible la surveillance de l'appareil, avec démarrage et arrêt automatiques du filtre, hors présence du personnel, l'entretien normal quotidien (lavages, graissages) demeurant assuré.

La régulation choisie (voir page 1144) est une régulation "Aval" à partir de la détection de trois phénomènes: fluage, accumulation de boue en zone de drainage et rotation du rouleau de drainage (figure 656).

- **Régulation "Aval"**

Causes de la perturbation → Effet (perturbation) → Détection rapide de la perturbation → Remèdes (action rapide).

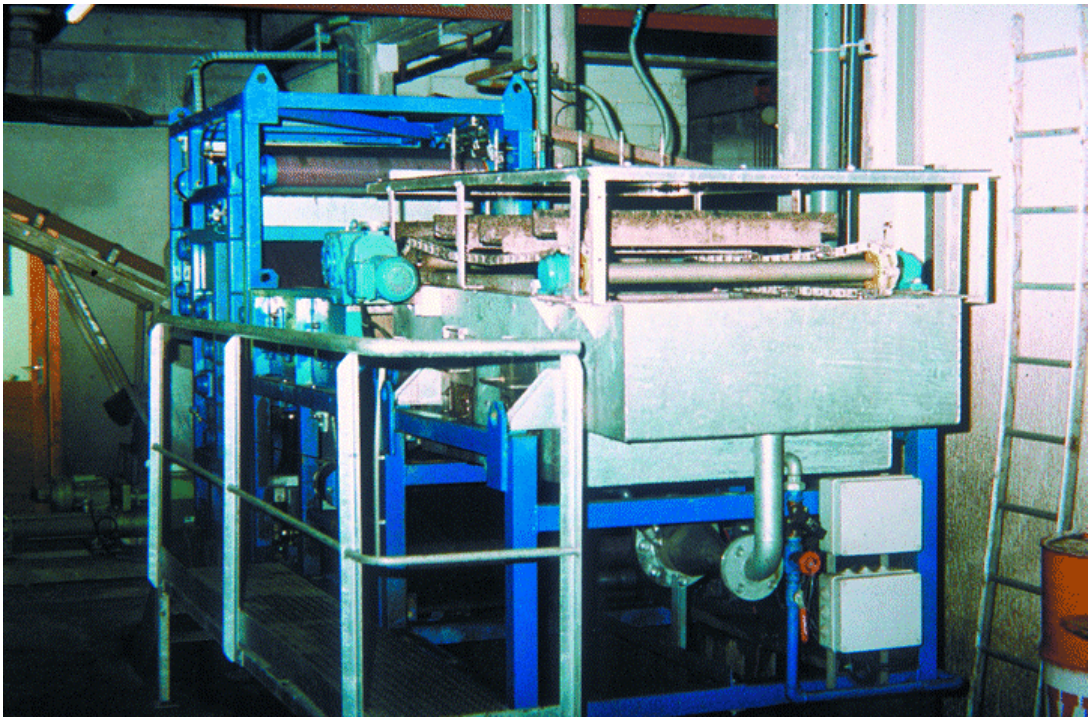


Figure 655. Installation de SAINT BON-TARENTAISE (Savoie). SUPERPRESSDEG avec GDE incorporée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

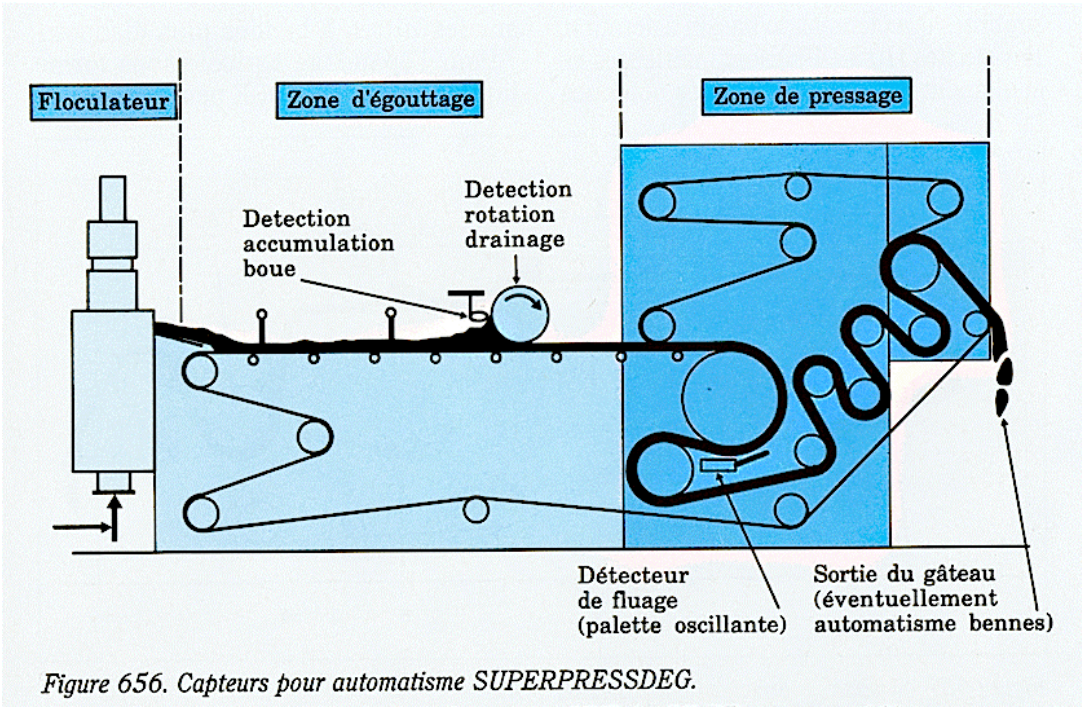


Figure 656. Capteurs pour automatisme SUPERPRESSDEG.

Ce mode de régulation nécessite un investissement relativement réduit et est géré par automate programmable.

Les indications fournies par les trois capteurs (huit au total) permettent d'agir automatiquement sur le débit de boue et (ou) de polymère.

Cet automatisme ne fait donc appel ni à des mesureurs de concentration des boues, ni à des débitmètres, de coût élevé.

2.5.3. Filtres à bandes pour petites stations d'épuration

Sur de petites stations produisant des boues biologiques difficiles (aération prolongée, laiterie, teinturerie), des filtres dits "simplifiés" permettent, avec un investissement relativement réduit, d'obtenir des boues de siccité certes faible, mais cependant pelletables.

2.5.3.1. La GD-PRESSE (voir figure 65 7) C'est en fait une grille de drainage GDE suivie d'un essorage rapide. Comme la GDE, la GD-PRESSE peut être alimentée avec des boues diluées en évitant ainsi l'installation d'un épaississeur statique intermédiaire.

La boue est floculée en conduite, au moyen d'un mélangeur statique cyclonique MSC (1), avant d'être introduite sur la grille GDE (2). Après drainage, la boue est précompactée par un rouleau d'égalisation (3) formant un passage en coin forcé. Portée par l'unique toile de filtration (4), la boue pâteuse est ensuite essorée par passage sous un rouleau fixe (5). Le temps de pressage est donc court et la pression assez faible.

La tension des bandes s'effectue par ressort (6). La toile, épaisse, est guidée mécaniquement par des flasques (7) à chaque rouleau.

Les capacités (MES) sont de l'ordre de 70 à 120 $kg.h^{-1}$ (presse de 1 m de largeur) pour une boue à 10-20 $g.l^{-1}$ et 30 à 60 $kg.h^{-1}$ pour des boues à 5-10 $g.l^{-1}$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

soutirées directement du bassin d'aération. Les siccités (10 à 14 %) sont inférieures de seulement 3 à 5 points à celles obtenues sur les filtres à bandes plus élaborés. Pour l'épandage agricole sous forme liquide, la GD-PRESSE peut être facile-

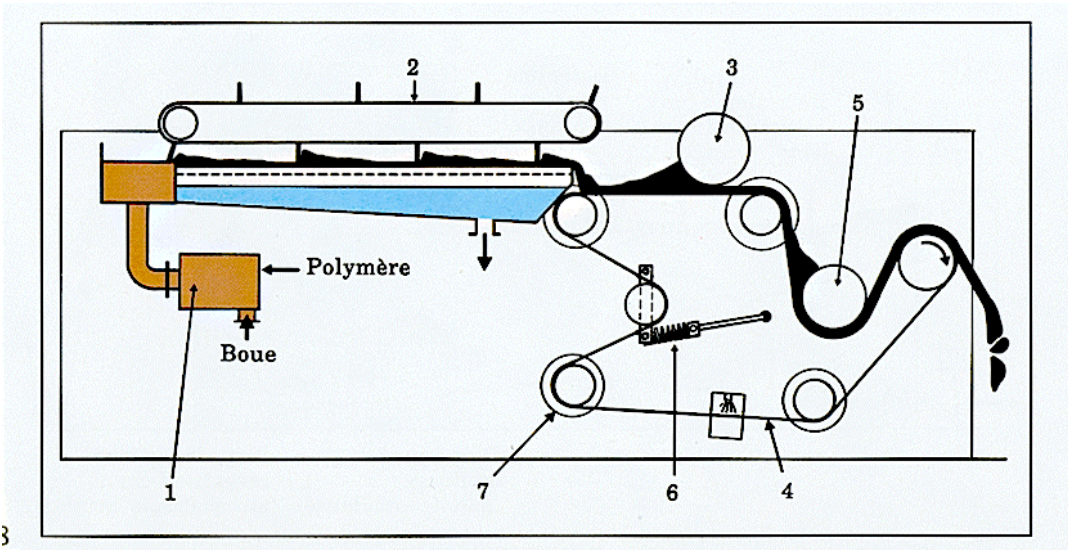


Figure 657. Schéma de principe de la GD-PRESSE.

Figure 657. Schéma de principe de la GD-PRESSE.

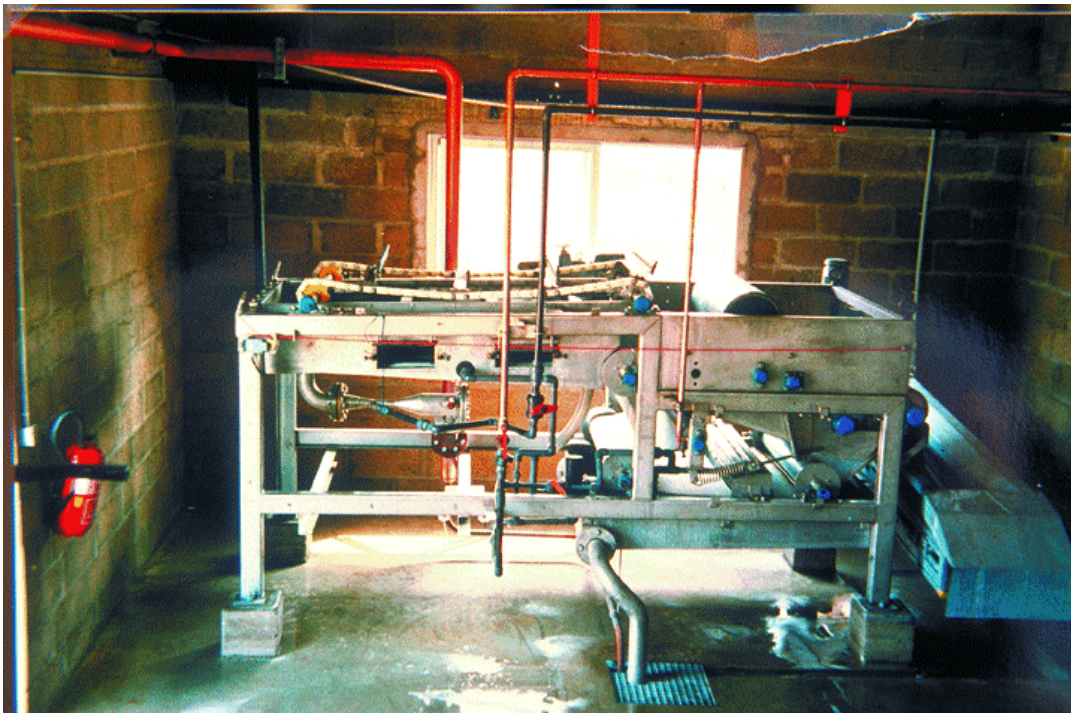


Figure 658. GD-PRESSE.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ment transformée en table de drainage, fournissant des boues épaisses à 5-7 % de MES.

2.5.3.2. Le T-DEG (voir figures 659 et 660)

C'est un petit filtre horizontal monobande : la boue floculée (1) est déversée sur une toile de filtration (2). Un hersage (3) permet une amélioration du drainage. Un précompactage est effectué par un rouleau (4) ne laissant passer qu'un tapis de boue de 2 à 3 cm d'épaisseur. Un compactage final est assuré par le rouleau (5) laminant le tapis de boue jusqu'à une épaisseur d'environ 1 cm. Le

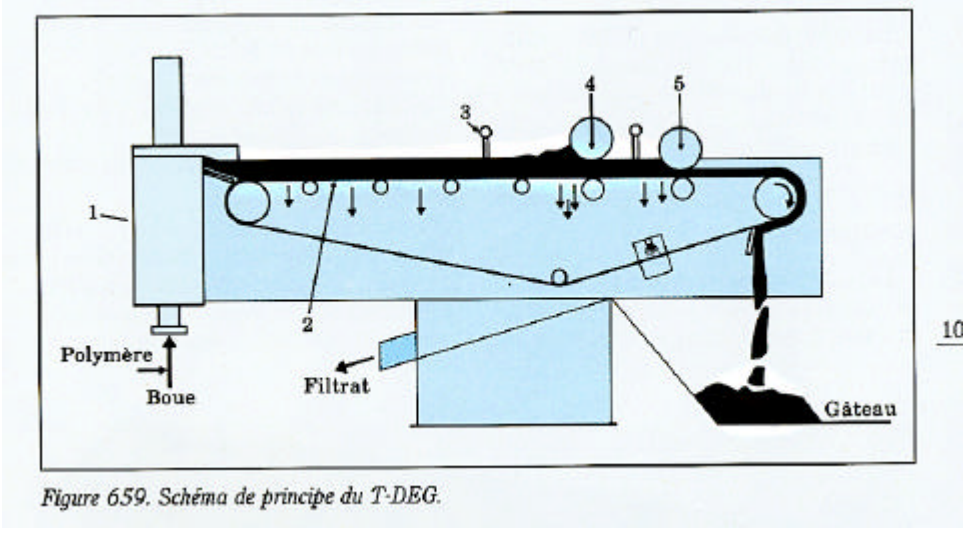


Figure 659. Schéma de principe du T-DEG.

Figure 659. Schéma de principe du T-DEG.

Figure 660. T-DEG sur boues de décarbonatafion (vue de dessus).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

T-DEG est en fait une table d'égouttage avec un système sommaire de pressage. L'aspect du gâteau est donc feuilleté.

Des siccités de 9 à 12 % sont obtenues sur des boues d'aération prolongée. Les capacités (MES) restent modérées mais suffisantes pour les petites collectivités locales : 30 à 50 $kg.h^{-1}$ pour un filtre de 1,2 m de largeur.

Le principal atout du T-DEG est sa grande simplicité de fonctionnement, avec des rendements de capture tout à fait exceptionnels, si la floculation est bien sûr réussie.

2.5.4. Unités mobiles de déshydratation

Les filtres à bandes presseuses peuvent être montés sur une plate-forme routière tractée, comportant également tous les organes de pompage et de conditionnement (figure 661).

L'intérêt d'un tel système est de pouvoir desservir plusieurs petites stations d'épuration, mais il se heurte à des difficultés variées

- stockage, et donc stabilisation efficace des boues,
- adaptation du fonctionnement à différentes qualités de boues,
- intempéries hivernales, -

gestion non centralisée des différentes stations,

- rayon d'action à limiter à une vingtaine de kilomètres.

Ce système est facile à développer à l'intérieur d'un même centre industriel (boue provenant d'ateliers éloignés). Les filtres à bandes peuvent alors, et dans certains cas, être remplacés par des centrifugeuses.

Figure 661. Unité mobile DEGRÉMONT - GDE + SUPERPRESS ST1.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. CENTRIFUGATION

Les centrifugeuses utilisables en traitement des boues résiduaires sont les décanteuses continues à bol cylindro-conique d'axe horizontal (voir page 200) qui permettent

- la déshydratation en **continu** dans une enceinte close, compacte, réduisant les nuisances olfactives et le coût de désodorisation des locaux,
- une **bonne séparation** des solides sur des boues très difficiles (boues d'hydroxydes peu concentrées, certaines boues très organiques). La centrifugation est aussi particulièrement adaptée au traitement de boues huileuses,
- une **surveillance réduite** en dehors des périodes de démarrage et à condition de traiter des boues suffisamment homogènes.

L'utilisation de décanteuses continues présente toutefois certaines sujétions

- **isolation phonique** de la salle, à étudier surtout dans les stations couvertes,
- **énergie consommée** nettement supérieure à celle des filtres à bandes et filtres-presses,
- **non-visualisation** de la boue pendant son traitement, et besoin d'une main-d'œuvre un peu plus qualifiée pour interpréter les refus d'extraction ou les mauvais rendements de séparation,
- **entretien significatif** avec des boues abrasives, par suite de l'usure prématurée des vis. Pour freiner cette usure, la plupart des constructeurs proposent des revêtements antiabrasion des filets de vis: carbure de tungstène pulvérisé, tuiles rapportées de carbure de tungstène fritté, chromage... En outre, sur la plupart des boues (urbaines notamment), un dessablage est conseillé, de préférence en amont d'un épaississeur, et par cyclone présentant un pouvoir de coupure de l'ordre de 50-80 µm,
- fortes contraintes mécaniques dues aux vitesses élevées du rotor et de la vis. Après chaque intervention sur l'un de ces deux organes, un rééquilibrage est nécessaire,
- relative sensibilité aux variations brutales de qualité et de concentration de boues, et nécessité de retrouver alors la meilleure combinaison des paramètres opérationnels: vitesse de vis, de bol et hauteur de l'anneau liquide.

3.1. PARAMÈTRES D'EXPLOITATION

3.1.1. Vitesse absolue du bol VA

La décantabilité est directement proportionnelle au carré de la vitesse de rotation du bol. Les champs centrifuges appliqués s'échelonnent de 500-1000 g (pour les gros diamètres) à 3 000-4 000 g (pour les machines de plus petite taille).

De fortes valeurs de V_A ($t.min^{-1}$) permettent d'accroître les débits et améliorent compactage et siccité. Mais elles augmentent bruit, usure, vibrations, et surtout, favorisent le reflux, en zone conique, de sédiments pâteux à texture fluante. Les modifications de V_A peuvent s'effectuer par changement de poulie motrice ou par moteur à vitesse variable, voire moteur hydraulique.

3.1.2. Vitesse relative V_R

C'est la différence de vitesse ($t.min^{-1}$) entre le bol et la vis. Ce paramètre essen-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tiel fixe la rapidité de convoyage du sédiment, et donc le temps de compactage. La différence de vitesse entre vis et bol est généralement obtenue par l'intermédiaire d'un réducteur à planétaires. De manière à éviter toute détérioration du réducteur, les décanteuses sont munies d'un limiteur de couple, dont la fonction est d'annuler V_R et, par là même, le couple, lorsque celui-ci atteint le maximum admissible.

La vitesse relative peut varier de 2 à 20 $t.min^{-1}$ dans la majorité des applications. Son augmentation permet d'accroître le débit volumique du solide décanté, dans les limites permises de remplissage de la vis. La figure 662 indique les variations du couple, de la siccité, et du taux de capture en fonction de V_R.

La diminution de V_R permet d'obtenir des sédiments plus secs, mais il est toujours utile de vérifier, en laboratoire, le taux de remplissage de l'anneau liquide en solide décanté, pour fixer certaines limites inférieures à V_R et éviter ainsi le bourrage de la vis d'extraction.

Le réglage de VR peut s'effectuer par poulie amovible, poulie étagée, variateur à courroie, ou encore par moteur hydraulique qui permet une très grande facilité d'adaptation aux qualités de boues (régulation du couple possible).

3.1.3. Profondeur de l'anneau liquide

La profondeur de l'anneau liquide est ajustable par déplacement d'ouïes de reprise aménagées dans le plateau fixé sur le bol en tête de zone cylindrique (figure 663).

1 - Un anneau liquide **bas** favorise la siccité en dégageant une plage d'essorage en zone sèche. Il faut cependant obtenir un sédiment suffisamment consistant, à la sortie de l'anneau liquide, pour vaincre l'effet **prolongé** de la force de reflux due à la conicité du bol. Pour améliorer la siccité, certains constructeurs proposent même une double conicité en zone d'essorage.

2 - Lorsque le sédiment est trop fluant, donc sensible au phénomène de reflux en zone sèche, il y a avantage à choisir un niveau liquide **haut,** de façon à réduire le plus possible la plage d'essorage. Extrac-

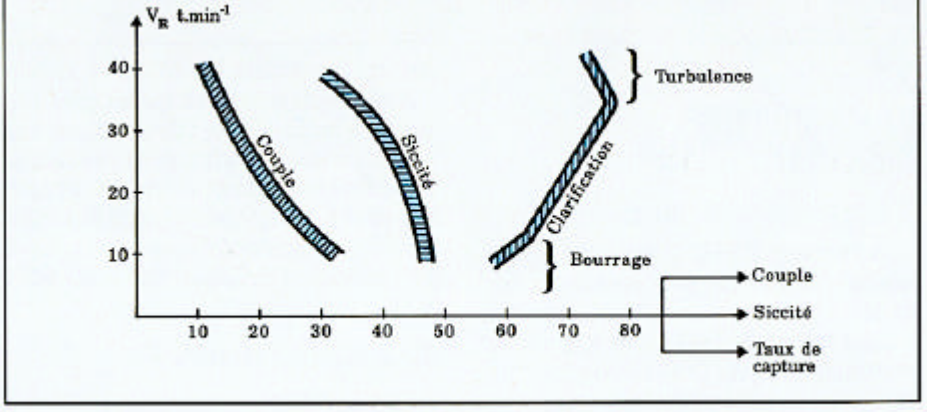


Figure 662. Influence de V_R sur les conditions de fonctionnement (tendances).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tion, et donc clarification, sont améliorées au détriment de la siccité. La facilité de réglage de l'anneau liquide conditionne la souplesse d'exploitation, surtout dans le cas de boues à texture inconstante.

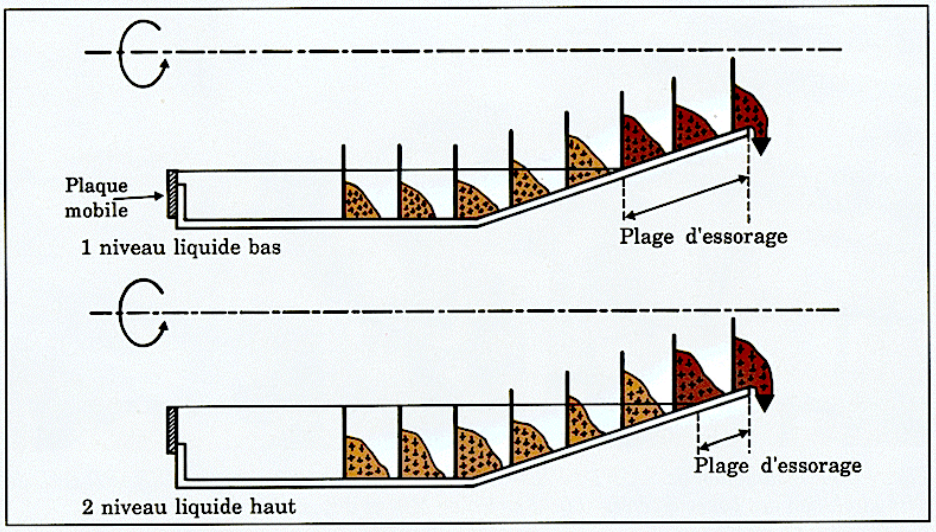


Figure 663. Réglage de l'anneau liquide.

3.2. PERFORMANCES

Comme pour le filtre à bandes, la recherche du meilleur polyélectrolyte est primordiale: il faut obtenir un floc très volumineux et très résistant. Peu importe, dans ce cas, la viscosité du liquide interstitiel, ce dernier ne devant traverser aucun support filtrant.

Il est difficile d'interpréter les tests de laboratoire pour prévoir le comportement de la boue en décantation dynamique, du fait des forces de cisaillement et des turbulences engendrées par la vis convoyeuse. Néanmoins, il est possible d'estimer une siccité (à quelques points près), ainsi que les débits possibles, en tenant compte du volume occupé par le sédiment sous l'anneau liquide (voir page 199). Il est toutefois quasiment impossible de prévoir le comportement rhéologique de taboue décantée dans l'enceinte tournante. De ce fait, il est encore procédé à de nombreux tests industriels pour cerner les performances optimales.

La meilleure évaluation du bon fonctionnement d'une décanteuse continue est le calcul du **rendement d'extraction** ou **taux de capture** Tc:

$$Tc = 1 - \frac{C_L\,(C_S - C_A)}{C_A\,(C_S - C_L)}$$

avec:

C_A = concentration de la boue à l'alimentation en % MES,

C_S = siccité du sédiment en % MS,

C_L = concentration du liquide clarifié ou centrat en % MES,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

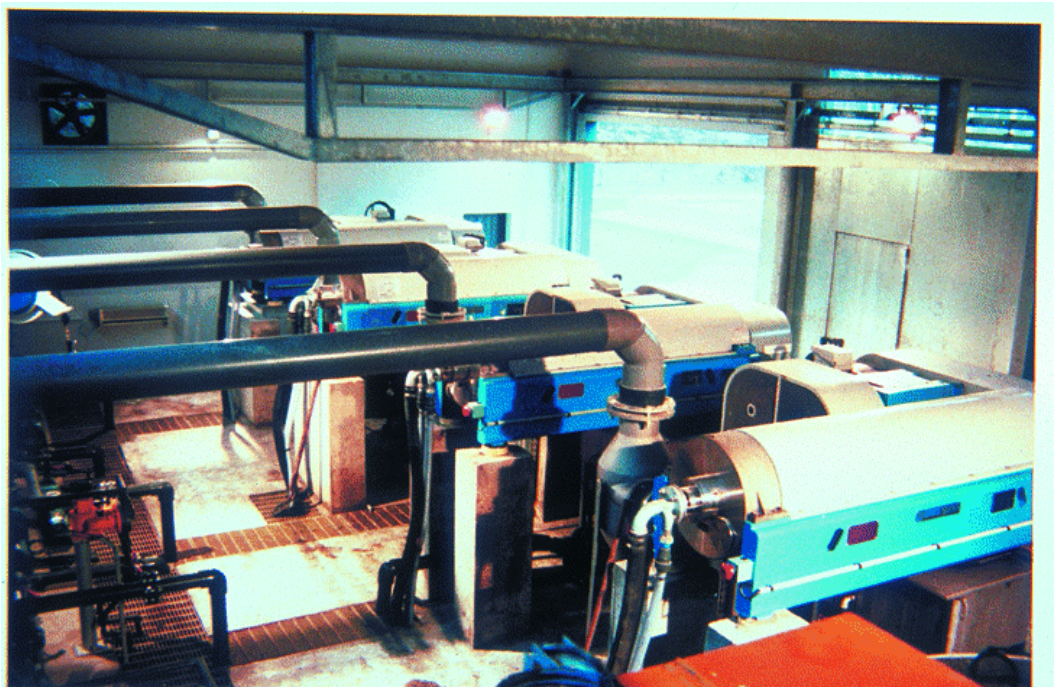


Figure 664. Installation de SAINT-BRIEUC (Côtes-du-Nord). 4 décanteurs GUINARD D4L de déshydratation des boues digérées (1000 kg.h^{-1} de MS) et d'épaississement des boues biologiques (30 m^3.h^{-1}).

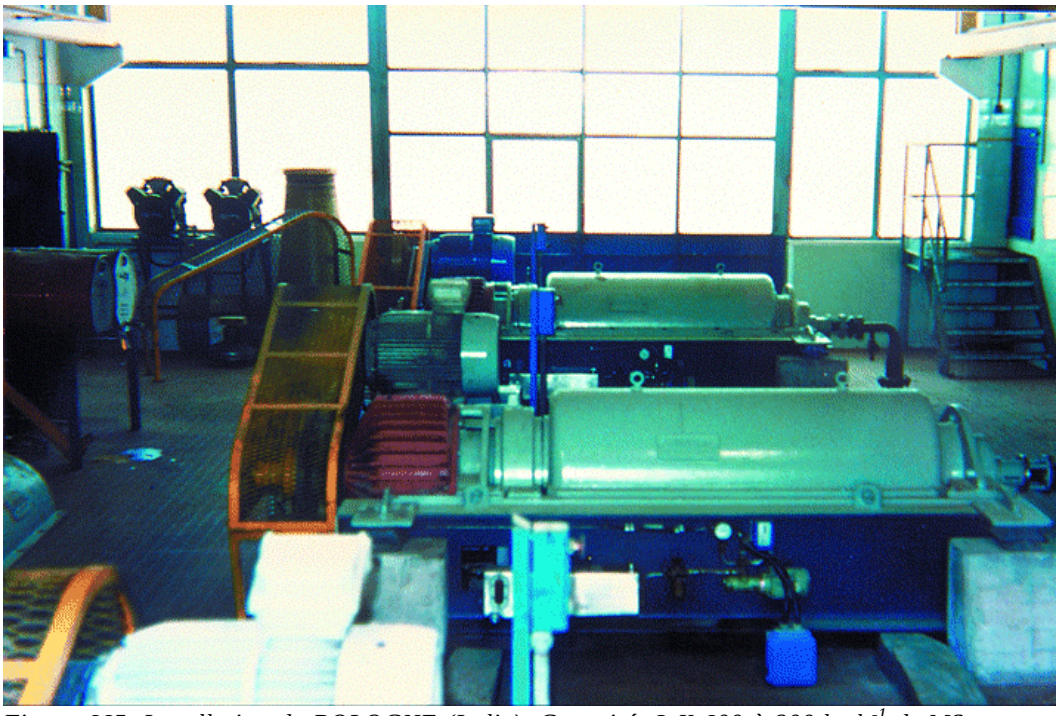


Figure 665. Installation de BOLOGNE (Italie). Capacité: 3 X 600 à 800 kg.h^{-1} de MS. Déshydratation de boues mixtes fraîches.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Cette formule, consacrée par l'usage, implique une double approximation dans la mesure et dans l'expression des concentrations, qui ne conduit pas à des erreurs très importantes dans les cas usuels de centrifugation.

La centrifugeuse doit normalement être réglée pour obtenir un Tc de l'ordre de 0,95, soit un rendement d'extraction de 95 %.

Les **siccités** de gâteau se rapprochent de celles obtenues sur un filtre à bandes presseuses classique. La fourchette des siccités possibles est restreinte, même en modulant les différents paramètres opérationnels, les débits de boue ou le dosage de réactifs.

La hauteur de l'anneau liquide, qui fixe la plage d'essorage, est souvent le paramètre déterminant du taux d'hydratation du sédiment. Les gâteaux obtenus ont généralement une structure "plastique".

Certains dessins de machine comportent dans la zone d'essorage conique un dispositif ayant pour but, sur des boues fibreuses, de compacter le sédiment et d'améliorer sa siccité au détriment, bien entendu, de la capacité de production.

Les **capacités** sont corrélées au diamètre de bol de la décanteuse, mais d'autres paramètres géométriques interviennent. Les possibilités hydrauliques généralement rencontrées sont les suivantes

Diamètre du bol cm	**Débit** $m^3.h^{-1}$
30 - 35	5 - 12
40-50	12-30
60 - 70	25 - 40
90 - 100	50 - 100
110-120	70-130

3.3. EPAISSISSEMENT DES BOUES EN EXCÈS PAR CENTRIFUGATION

Pour ce type d'application, différentes constructions sont utilisées

- décanteuses continues cylindro-coniques classiques, mais à paramètres constructifs et opérationnels adaptés (conicité, vitesses, longueur de clarification, disques de retenues en partie conique...),
- décanteuses continues spécifiques (cylindriques à buses par exemple).

Avec les machines classiques, le degré d'épaississement obtenu (4 à 6 % MS) est meilleur qu'en flottation; il est plus faible avec les machines à buses (4 à 4,5 %).

Les décanteuses spécifiques permettent d'obtenir des siccités de boues épaissies régulières (machines à buses notamment). Ce n'est pas toujours le cas avec les machines classiques où la siccité fluctue avec le flux massique.

Les installations sont très compactes, mais certaines contraintes sont à prendre en considération

- **consommation énergétique** élevée environ 0,8 à 1,2 $kWh.m^{-3}$ avec polyélectrolyte et 1,3 à 2 $kWh.m^{-3}$ sans,
- **avec les décanteuses classiques**, **débit hydraulique relativement** modéré si l'on veut une clarification acceptable. Le centrat reste toutefois chargé de fins colloïdes peu décantables et, sans réactif, contient généralement encore entre 0,8 et 1,2 $g.l^{-1}$ de MES. Le débit se situe par

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

exemple vers 8-15 $m3.h^{-1}$ pour un bol Ø 400 mm et 60-80 $M3.h^{-1}$ pour un bol Ø 1100mm. Ces décanteuses ne sont guère adaptées aux boues de qualité trop variable, qui nécessitent de changer fréquemment les paramètres de fonctionnement (vitesses bol et vis, et anneau liquide). De ce fait, l'emploi de polyélectrolyte est parfois nécessaire pour **stabiliser** les rendements de séparation et les siccités. Les teneurs en MES des centrats peuvent être alors abaissées à moins de 0,8 $g.1^{-1}$, et les débits sont augmentés,

- **avec les décanteuses spécifiques, clarification généralement meilleure** et dosage plus occasionnel de polyélectrolyte. Cependant, un tamisage fin doit être prévu si la boue épaissie traverse des orifices de faible diamètre (buses par exemple). Sur des boues peu concentrées, des débits de 100 $m^3.h^{-1}$ et plus peuvent être atteints avec des bols de très gros diamètre (1,2 à 1,4 m),

intérêt de la digestion anaérobie, qui assure l'homogénéisation des boues épaissies avant déshydratation. Dans ce cas, on doit limiter le taux d'épaississement pour éviter les mauvais brassages de boue trop visqueuse.

3.4. MISE EN OEUVRE

Outre le dessablage, un dégrillage (10 à 15 mm) est parfois aussi utile pour les petites centrifugeuses travaillant sur des boues très hétérogènes. Dans la majorité des cas, les autres centrifugeuses n'ont pas besoin de ce dégrillage complémentaire. Toutefois, celui-ci est généralement mis en oeuvre sur les boues diluées en entrée d'épaississeur, pour la protection des systèmes de pompage.

L'alimentation des décanteuses doit être la plus régulière possible (pompe volumétrique, à rotor excentré très souvent), car le taux de capture est très dépendant des variations de débit qui influent sur la qualité de la floculation.

L'installation peut être entièrement automatisée

- enregistrement permanent du couple entre vis et bol, et action sur la vitesse relative ou la pompe à boue,

- mesure de la turbidité du centrat, et action sur le dosage de polymère ou sur le débit de boue. Des moussages, souvent fréquents, peuvent toutefois perturber cette mesure.

Il est très utile également, pour ce type d'installation, de commander à distance les pompes à boues et à polymère, et corriger ainsi très rapidement un taux de capture insuffisant.

Les opérations d'entretien (démontages) ne peuvent être effectuées que par un mécanicien spécialement formé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. SÉCHAGE - INCINÉRATION

Le **séchage**, terme généralement réservé au **séchage thermique**, consiste à évacuer par évaporation l'eau interstitielle présente dans les boues. Le séchage peut être partiel (teneur en eau résiduelle de 30 à 10 %) ou quasi total (teneur en eau de 5 à 10 %).

L'incinération conduit non seulement à l'élimination totale de l'eau interstitielle mais également à la combustion des matières organiques des boues. C'est le procédé permettant d'obtenir les résidus dont la masse est la plus faible: les cendres, constituées par les seules matières minérales de la boue.

Un procédé d'incinération englobe évidemment toujours une phase de séchage avant l'inflammation de la partie organique combustible de la boue.

Le seul séchage thermique n'est généralement envisagé que si le produit final est récupérable sous forme d'amendement agricole, ou si les conditions de décharge imposent une structure solide du déchet. Une "énergie-déchet" est généralement recherchée pour assurer l'évaporation par exemple biogaz ou gaz chaud d'un four d'incinération.

Le séchage ou l'incinération ne sont généralement appliqués qu'à des boues ayant subi une déshydratation préalable car l'élimination mécanique de l'eau est beaucoup moins coûteuse que son évaporation. On peut cependant, dans quelques cas, évaporer directement (par séchage ou par incinération) l'eau des boues liquides

- faible volume de liqueurs concentrées, qu'il est plus économique de détruire par combustion que par traitement biologique, -
- utilisation de combustibles à bas prix solvants usés dans certaines industries de chimie organique, huiles usées, etc.,
- combustion mixte avec d'autres résidus assurant l'appoint calorifique ordures par exemple.

Le coût élevé de l'énergie thermique conduit à une mise en oeuvre limitée de ces procédés d'élimination directe de boues liquides.

Le chapitre 8, sous-chapitre 7, rappelle quelques notions fondamentales de thermique.

4.1. BILAN THERMIQUE

Dans le cas d'un simple séchage, la totalité des calories provient d'une source extérieure et nécessite une consommation de carburant.

Dans l'incinération, la quantité de chaleur importante fournie par la combustion des MO des boues peut, dans certains cas, apporter toutes les calories nécessaires à l'entretien de la combustion: les boues sont dites alors **autocombustibles**. Avec des boues résiduaires urbaines contenant 70 % de M0, la limite d'autocombustibilité se situe entre 72 et 62 % d'humidité, suivant le type d'incinérateur, mais surtout suivant le degré de récupération de l'enthalpie des fumées de combustion.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le bilan thermique est l'élément essentiel de la détermination des caractéristiques d'un four: il permet son dimensionnement et l'évaluation des frais d'exploitation.

Des analyses nombreuses, sur différentes boues urbaines, donnent la composition moyenne suivante des MO

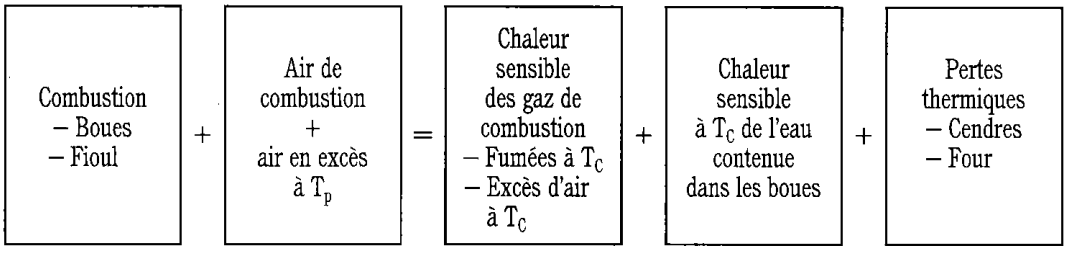
	C%	**H%**	**O%**	**N%**
Boue fraîche	56-62	7,9-8,7	26,5-29	3,5-6,8
Boue digérée	53-59	7,2-8,5	28-31	3-7

Les PCI des boues urbaines se situent généralement entre 4 500 et 6 000 $kcal.kg^{-1}$ MV.

Le bilan thermique est la somme de **termes positifs,** correspondant à la quantité de chaleur dégagée par les produits combustibles ou apportée par les produits comburants, et de **termes négatifs,** correspondant à la quantité de chaleur absorbée par les produits de combustion, l'évaporation de l'eau, les cendres et le four.

4.1.1. Formulation générale

De façon générale le bilan thermique peut s'établir comme indiqué sur la figure 665b.



$$(P + F) + \gamma\ (PV_B + FV_F)\ C_A T_P = (PV_G + FV_C)\ C_F T_C + (\gamma - 1)\ [PV_B + FV_F]\ C_A T_C + \frac{1 - S}{S}\ \Delta H_{H_2O} + 0{,}05\ (P + F)$$

Figure 665b. Bilan thermique d'une incinération de boue.

Avec:

P : PCI des boues sèches

F : Appoint calorifique en combustible

? : Coefficient d'exc édent d'air (combustion stoechiométrique Y =1)

V_B : Pouvoir comburivore des boues

V^F.: Pouvoir comburivore du combustible

C_A: Chaleur spécifique de l'air

T_p : Température de l'air de combustion

V_G : Pouvoir fumigène des boues

V_C.: Pouvoir fumigène du combustible

C_F: Chaleur spécifique des fumées

T_c: Température des fumées à la sortie du réacteur (souvent température de combustion)

S : Siccité des boues

? H_{H20} : Différence d'enthalpie de l'eau entre 20 °C et Tc

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.1.2. Exemple de calcul simplifié

Un bilan simplifié en kcal.h^{-1} s'établit comme suit

Chaleur entrante CE = (Qv X PCI) + [(EXA + V_{BV}) X 0,242 x T_P]

Chaleur sortante CS = [0,301 X T_c X (Q_s + V_{BV} + Q_{H2O} + EXA)] + (Q_{H2O} X 586)

Pertes thermiques $PTH = 10^{(5 + \sqrt[3]{\frac{C_N}{k}})}$

Si CE < CS + PTH : Apport obligé de combustible extérieur Si CE > CS + PTH : Système autothermique

avec:

Q_v : Masse de MV à incinérer en kg.h^{-1}

PCI: Pouvoir calorifique inférieur des MV (kcal.kg^{-1} MV)

V_{BV} : Pouvoir comburivore des MV en kg air.h^{-1}, de formule simplifiée

$$V_{BV} = Q_V \times \frac{PCI}{1000} \times 1{,}405$$

EXA : Masse d'air en excès en kg air.h^{-1} de formule simplifiée

$$EXA = \frac{(VFH + 1{,}244\, Q_{H_2O}) \times T_{O_2}}{(0{,}209 - T_{O_2})} \times 1{,}287$$

TO_2 : Taux d'oxygène dans les fumés humides (Exemple 7 % : To_2 = 0,07)

VFH : Volume de fumées humides en Nm^3.h^{-1} (de formule simplifiée

VFH = V_{GV} X 0,76)

V_{GV} : Pouvoir fumigène des MV en kg fumées.h^{-1} (V_{GV} = Q_v + V_{BV})

Q_S: Masse de MS à incinérer en kg.h^{-1}

Q_{H20} : Quantité d'eau à évaporer en kg.h^{-1}

C_N : Charge nominale du four en kg gâteau.h^{-1}

K : Coefficient selon type de four =

- lit fluidisé K = 35
- four étagé à pyrolyse, chambre externe K = 26
- four étagé à pyrolyse, chambre interne K = 29

NOTA: Domaine d'application de ce bilan simplifié

- boues d'ERU,
- 4 000 < PCI < 6 000, (kcal.kg^{-1} MV),
- four à lit fluidisé ou four étagé à pyrolyse - charge du four entre 1 à 10 t.h^{-1} de gâteau,
- T_c entre 750 et 950 °C,
- T_p maxi 550 °C en lit fluidisé, maxi 630 °C en four à pyrolyse,
- précision sur PTH : ± 20 %,
- précision bilan thermique ± 6 %.

Pour limiter les dépenses d'énergie, le débit d'air doit être le plus proche possible du pouvoir comburivore ; cependant, dans la pratique, il est difficile de descendre en-dessous d'un excès d'air de 30 à 40 %. Suivant la technologie des unités d'incinération (et principalement de la récupération sur gaz chauds), la chaleur à fournir aux seules fins d'évaporation est comprise entre 5 000 et 7 500 kJ.kg^{-1} d'eau (1200 à 1800 kcal.kg-1).

La figure 666 indique la zone d'autocombustibilité des boues en fonction de leur humidité et du rapport

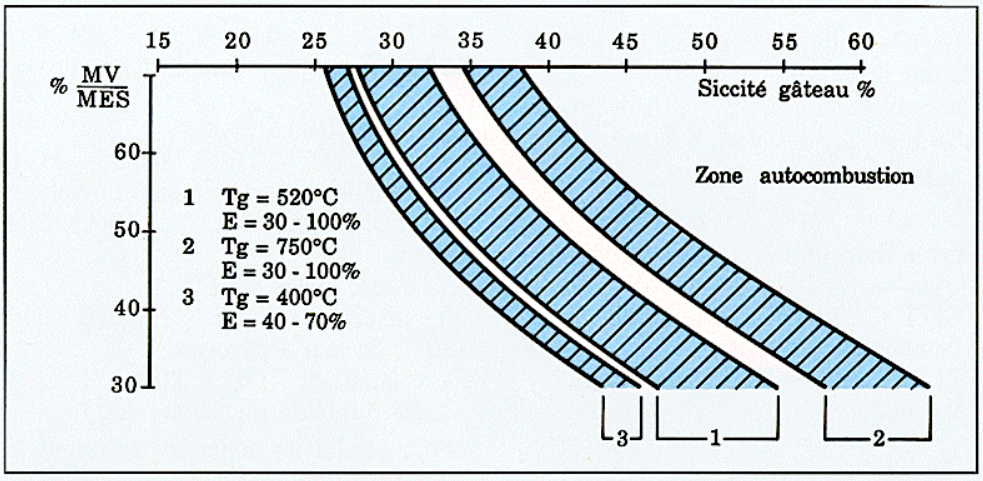
$$\frac{MV}{MES}$$

pour une marche industrielle.

Toutefois, pour la protection de l'environnement, les législations tendent de plus en plus à imposer sur les fumées une montée en température jusqu'à 700-900 °C, ainsi qu'un taux minimal d'oxygène relativement fort, de façon à assurer l'oxydation totale des matières organiques. Ces exigences dégradent le bilan thermique du four et il faut alors soigner tout particulièrement

- la déshydratation préalable des boues, - la récupération des calories sur les fumées chaudes plus ou moins chargées de poussières.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



PCI = 5500 Kcal.kg^{-1} MO.
Tg = Température de sortie des gaz de fumée.
E = Excès d'air en % de l'air théorique de combustion (6,5 Nm^3.kg^{-1} MO).

Figure 666. Zones d'autocombustion.

4.2 ÉLÉMENTS PRINCIPAUX D'UN POSTE DE SÉCHAGE OU D'INCINÉRATION

Le sécheur ou le four ne constituent pas les seuls éléments d'un poste de séchage/ incinération. On distingue essentiellement

- **le dispositif d'alimentation en boues**

- avec ou sans stockage régulateur, muni de son extracteur,
- avec ou sans émottage,
- par tapis roulant, convoyeur en auge à chaîne sans fin, pompe gaveuse volumétrique

- **le sécheur ou (et) le four proprement dits)**
- **le(s) systèmes) de ventilation**

véhiculant gaz ou air de séchage, gaz ou air de combustion, air de fluidisation, airs de refroidissement divers,

- pour fonctionnement en pression ou dépression,
- avec un ou plusieurs points d'introduction dans l'unité de séchage/incinération.

- **le(s) récupérateurs) de chaleur, souvent nécessaires)** sur les gaz de séchage ou de combustion: réchauffeur d'air comburant, chaudière de récupération pour production de vapeur ou d'eau surchauffée, économiseur sur le circuit final basses calories pour production d'eau chaude.
- **la source de chaleur auxiliaire**

- extérieure ou intérieure à l'unité (avec brûleurs d'appoint et de démarrage).

- **le dispositif de régulation de l'unité de séchage/incinération :** températures, pression-dépression, oxygène dans les fumées, débit de boue, d'air...

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **l'ensemble de dépoussiérage**

- par cyclone, de préférence sur fumées partiellement refroidies,
- par voie humide (laveur à pulvérisation, à venturi...),
- par voie électrostatique.

l'évacuation des cendres

- continue ou discontinue,
- à sec, en conteneurs fermés,
- par voie hydraulique (par pompage de suspensions de concentration inférieure à 200-300 $g.l^{-1}$),
- humidifiées, en conteneurs ouverts.

4.3. SÉCHAGE

L'élimination de l'eau interstitielle d'une boue, dans une étuve à température constante, fait apparaître essentiellement deux phases de séchage (figure 667)

- une phase de **séchage rapide** à vitesse constante (zone 1), durant laquelle la pression partielle du liquide qui s'évapore à la surface du matériau est égale à la pression de vapeur à la température considérée. Il y a migration de l'eau de l'intérieur vers la surface. Toute l'eau de capillarité est évacuée.
- une phase de **séchage ralenti** (zone 2) qui correspond à une variation de la pression de vapeur en profondeur, provoquée par le gradient de température de la surface vers le coeur du matériau. Il y a diffusion de la vapeur formée à travers la couche limite superficielle. Durant cette phase, l'eau extraite présente une énergie de liaison beaucoup plus forte.

Lorsque, dans des matériaux hygroscopiques, l'humidité est fixée essentiellement par des forces adsorptives ou osmotiques, le séchage est caractérisé essentiellement par la zone 2. C'est fréquemment le cas des boues d'ERU, surtout s'il s'agit de boues prédéshydratées mécaniquement.

A la fin du séchage, l'humidité du matériau est en équilibre avec celle du milieu ambiant dans le sécheur.

Il n'est pas utile, dans les sécheurs

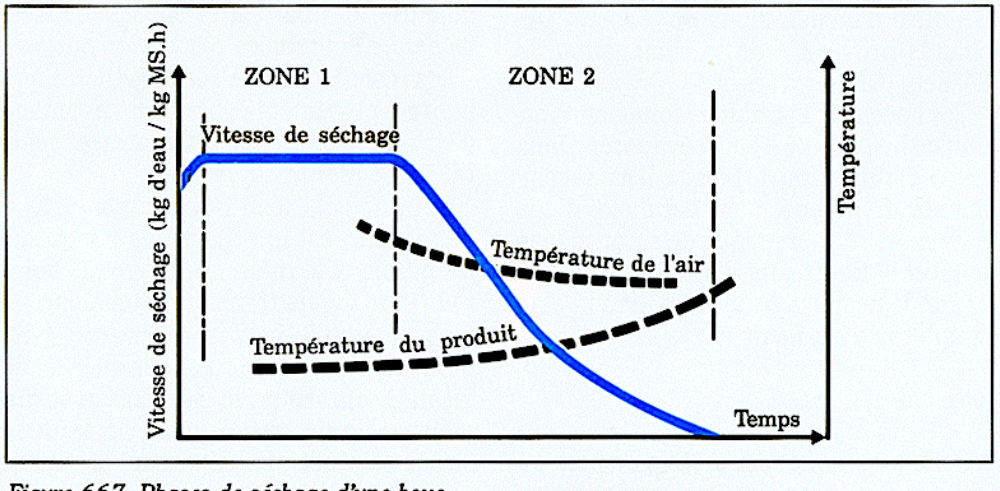


Figure 667. Phases de séchage d'une boue.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

industriels, de descendre en-dessous d'une humidité résiduelle de 5 %. Si le matériau séché est ensuite stocké à l'extérieur, même à l'abri des précipitations, il risque en effet de se réhumidifier en fonction de l'hygrométrie ambiante.

La **vaporisation** est d'autant plus intense que:

- la pression partielle de vapeur dans l'air environnant est plus faible (donc la température plus élevée),
- la surface du matériau est plus développée,
- le renouvellement de cette surface en contact avec la source calorifique est plus fréquent.

Le séchage peut être **direct**, avec mise en contact des boues avec des gaz de combustion, ou **indirect**, avec apport calorifique uniquement par surfaces d'échange (chauffées par de la vapeur dans la plupart des sécheurs indirects industriels).

Le séchage permet également l'obtention de boues stérilisées. Les sources de chaleur employées sont diverses et de préférence de récupération: biogaz, vapeur produite dans les réchauffeurs d'unités d'incinération, ou encore gaz chauds provenant de la combustion de déchets (OM, écorces...).

Tout sécheur est dimensionné en fonction de la quantité d'eau à évaporer. Dans le cas d'utilisation de biogaz, il est recommandé de disposer, en parallèle, d'une autre source énergétique de secours (gaz naturel - fioul), afin d'assurer, en particulier, le démarrage de l'installation et la souplesse d'exploitation.

4.3.1. Séchage indirect

Cette technique met principalement en oeuvre des sécheurs comprenant une **enveloppe cylindrique fixe,** souvent chauffée, dans laquelle tournent un ou plusieurs **rotors**. Ceux-ci portent différents organes creux de malaxage, dans lesquels circule de la vapeur sous pression (ou plus rarement une huile caloporteuse).

L'absence de contact entre le fluide chauffant et la boue permet de **supprimer les nuisances olfactives.** En effet, la production de buées malodorantes est très réduite, et leur épuration est donc aisée et efficace.

Les buées, très riches en eau (faible débit d'air utilisé pour le seul balayage de l'enceinte), sont donc facilement condensables. Cette condensation permet de récupérer une quantité non négligeable de chaleur (eau chaude à 70-80 °C), pour le chauffage des boues de digestion par exemple.

Les **incondensables,** malodorants mais de faible volume (5 à 10 % du volume des buées), sont brûlés dans la chaudière de production de vapeur ou dans l'unité d'incinération couplée au sécheur (four d'OM ou de boues).

Les buées ne contiennent qu'une faible quantité de particules poussiéreuses, facilement éliminées par cyclonage.

Les installations de séchage thermique indirect présentent également l'avantage d'être compactes, peu bruyantes, et généralement assez propres.

Le principal écueil à éviter avec ce type de sécheur, est le collage des boues sur les parois et le rotor, qui provoque bourrage et mauvais transfert de chaleur.

La majorité des procédés nécessite donc un recyclage de la boue séchée, de façon à alimenter le sécheur avec un mélange de siccité voisine de 45 %. Cette siccité permet de dépasser la phase plastique collante qui caractérise une

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

grande majorité des boues organiques traitées par centrifugeuse ou filtre à bandes. Avec certains types de boues, ce recyclage peut être cependant évité.

Un bon exemple de cette technique, est le procédé NARATHERM.

4.3.1.1. Procédé NARATHERM

- **Description du sécheur** (voir figure 668). Le sécheur comprend une enveloppe, chauffée à la vapeur (1), dans laquelle tournent, en sens opposés, deux arbres parallèles (2) qui portent sur toute leur longueur des aubes creuses (3) formées de demi-disques à épaisseur variable équipés de racleurs. La vapeur (4) transite également à l'intérieur de chaque rotor et de chaque pale de brassage.

Le produit à sécher est ainsi brassé, émotté et raclé dans un parcours en forme de spirale.

La vitesse de rotation des rotors est assez lente, de l'ordre de 10 à 20 $t.min^{-1}$.

Après avoir traversé le sécheur légèrement incliné, les boues séchées sortent par trop plein réglable (5) qui permet de faire varier le taux de remplissage de l'enceinte thermique.

Des temps de séchage de l'ordre de l'heure rendent ce sécheur, bien brassé, relativement peu sensible aux variations de débit

La siccité du produit final est modulée en injectant plus ou moins de vapeur. Elle peut être réglée aisément de 65 à 95 %. Au-delà de 75-80 %, le produit sec est finement morcelé. Au-delà de 90 %, il commence à devenir poudreux. Une postgranulation est possible, selon les exigences de l'utilisation finale.

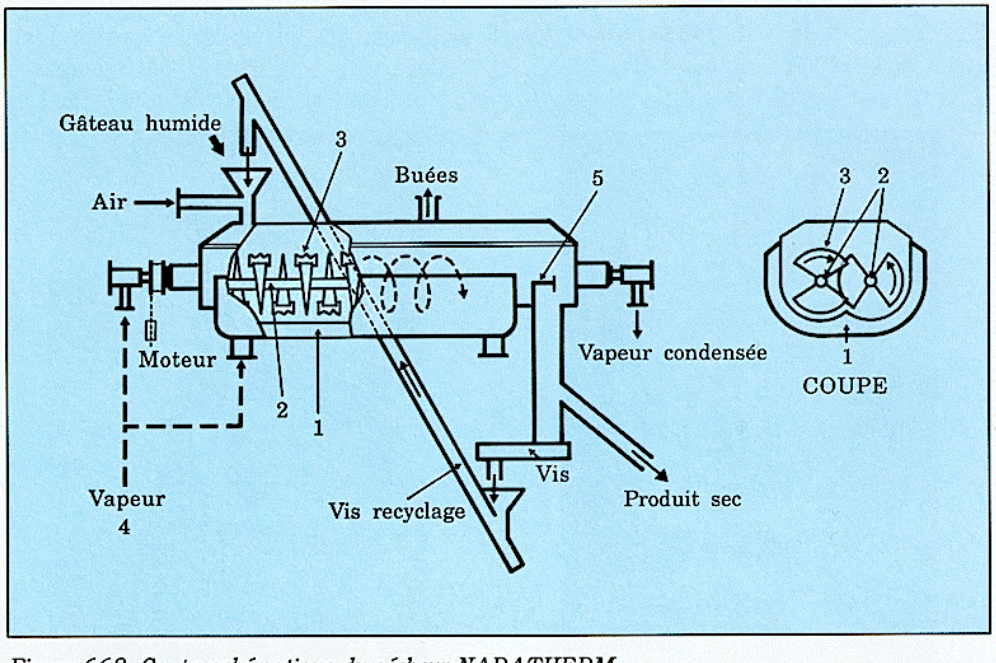


Figure 668. Coupe schématique du sécheur NARATHERM.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Description d'une installation** (voir figure 670).

Les boues (1) sont introduites dans une vis de mélange (2) où elles sont mélangées avec des boues séchées recyclées (3). Celles-ci peuvent être la partie fine d'un tamisage des boues séchées. Le mélange (40 à 50 % de siccité) est introduit dans le sécheur.

Les boues en sortent (4) à 80-100 °C environ et sont généralement refroidies dans une vis à double paroi (5). Le recyclage (3) de boues séchées est modulable en fonction de la qualité des boues à sécher.

Pour assurer un balayage de la partie supérieure du sécheur, des gaz (et appoint d'air) sont recyclés. Après passage dans un cyclone (6), où les fines poussières sont retenues, ce mélange de
gaz recyclés et d'eau évaporée transite dans une tour de condensation (7).

Les gaz incondensables non recyclés et l'air d'appoint de balayage sont évacués, généralement vers la chaudière.

La vapeur circule en circuit fermé; les condensats retournent en chaudière; les pressions généralement utilisées à l'entrée du sécheur sont de l'ordre de 12 bars.

Différents capteurs peuvent permettre le contrôle de l'installation de séchage thermique: pression vapeur, dépression de l'enceinte, débit de boues à sécher, siccité des boues séchées, température, etc.

Les surfaces de chauffe atteignent jusqu'à 150 m^2 Les consommations de vapeur sont de l'ordre de 1,3 à 1,5 kg de vapeur par kg d'eau à évaporer soit, en tenant compte des pertes des circuits, des consommations d'énergie de l'ordre de 800 à 900 kcal par kg d'eau évaporée.

Le taux d'évaporation, au m^2 de surface globale de chauffe, est de l'ordre de 12 à 14 kg d'eau par m^2 et par heure.

Le sécheur est généralement construit en acier inoxydable. L'exploitation d'un système NARATHERM est relativement aisée: démarrage rapide et possible à pleine charge, surveillance limitée. L'entretien consiste principalement à remplacer les pièces d'usure et, éventuellement à

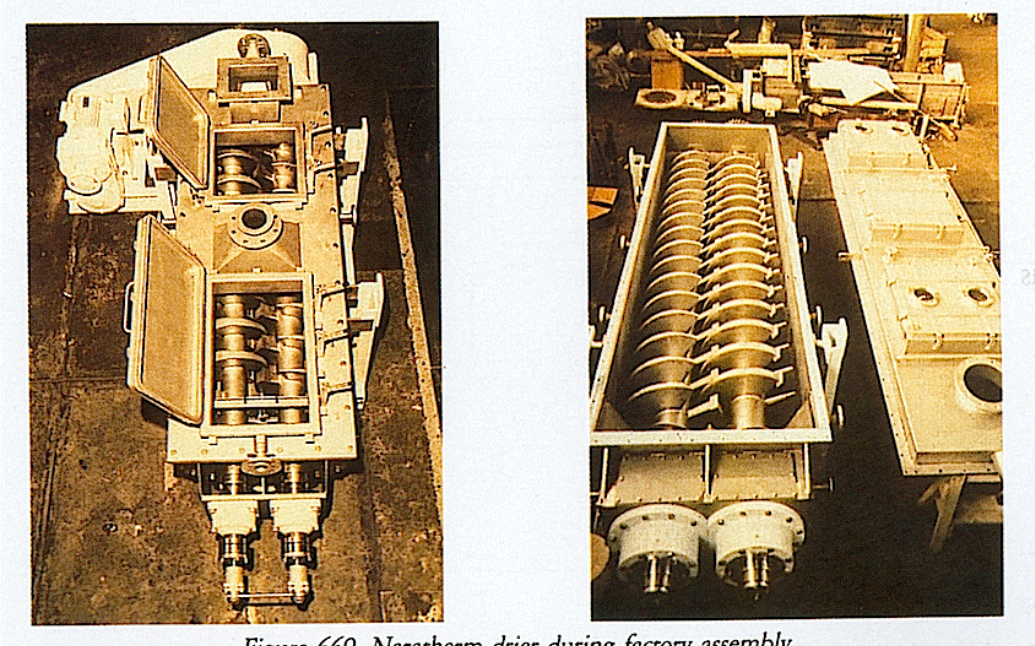


Figure 669. Naratherm drier during factory assembly.

Figure 669. Sécheur NARATHERM au montage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

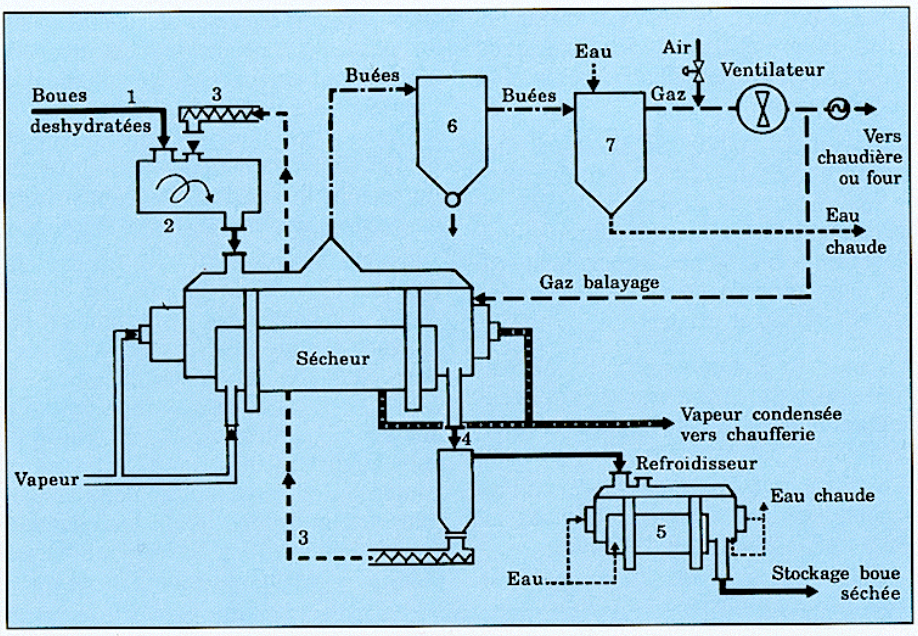


Figure 670. Schéma d'installation NARATHERM.

recharger les premiers disques du rotor si les boues sont abrasives.

4.3.1.2. D'autres sécheurs de même principe sont utilisables. Ils peuvent se différencier par la technologie du rotor interne

- rotor mono-arbre entraînant de multiples faisceaux tubulaires spiralés,
- rotor mono-arbre entraînant de grands disques creux disposés parallèlement,
- rotor à ailettes tournant à grande vitesse et projetant la boue en couche mince sur une enveloppe chauffante. Ce sécheur est utilisé en préséchage (siccité 45-55 %). Il est suivi normalement d'un second étage (rotor à aubes par exemple), pour pousser la déshydratation à 90 de siccité environ. Ce système, plus onéreux, évite le recyclage de produit sec, mais nécessite une alimentation très régulière en boue.

4.3.2. Séchage direct

L'évaporation de l'eau s'effectue par contact direct de la boue avec des gaz chauds. Les gaz extraits sont constitués par l'eau d'évaporation et les gaz de séchage. Le volume de ces fumées, malodorantes, est **important.** Des installations coûteuses sont nécessaires pour le dépoussiérage (poussières fines entrainées en assez grande quantité), pour le lavage et pour la désodorisation (par voie chimique, ou par incinération dans une chambre de postcombustion).

4.3.2.1. Sécheur rotatif tubulaire (figure 671).

C'est la technique la plus répandue en séchage direct La source d'énergie peut être les gaz de combustion d'une chaudière à gaz (biogaz le plus souvent) ou, éventuellement, d'une chaudière à

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

déchets (écorces de bois par exemple). Elle peut être également des gaz chauds provenant d'un four d'incinération (OM généralement).

Le sécheur rotatif est constitué d'un **cylindre tournant** (1 à 2,5 m de diamètre et une dizaine de mètres de longueur), légèrement incliné sur l'axe horizontal. Ce cylindre est généralement supporté par deux anneaux de roulement montés sur couronnes et galets.

L'intérieur du tambour est équipé d'organes divers assurant **brassage et avancement lent** de la boue humide en cours de séchage, par exemple

- tambour divisé en une série de compartiments par des chicanes obligeant un parcours en quinconce des boues,
- tambour à trois étages, composé de trois cylindres disposés horizontalement de manière concentrique: la boue à sécher a un parcours obligé du cylindre intérieur vers le cylindre extérieur,
- tambour de type sécheur à ciment équipé d'ailerons dans sa première partie, puis de fléaux d'émottage, et ensuite de palettes favorisant l'échange thermique.

Les gaz chauds (120-200 °C), aspirés par ventilateur, sont au préalable débarrassés des poussières par cyclonage. Ils peuvent ensuite être désodorisés dans une chambre de postcombustion à 800-900 °C (avec récupération possible sur un réchauffeur d'air), ou renvoyés dans le four d'incinération d'OM en cas de couplage des deux unités. Dans le premier cas, un dépoussiérage final humide complémentaire est en général nécessaire pour atteindre les normes de rejet.

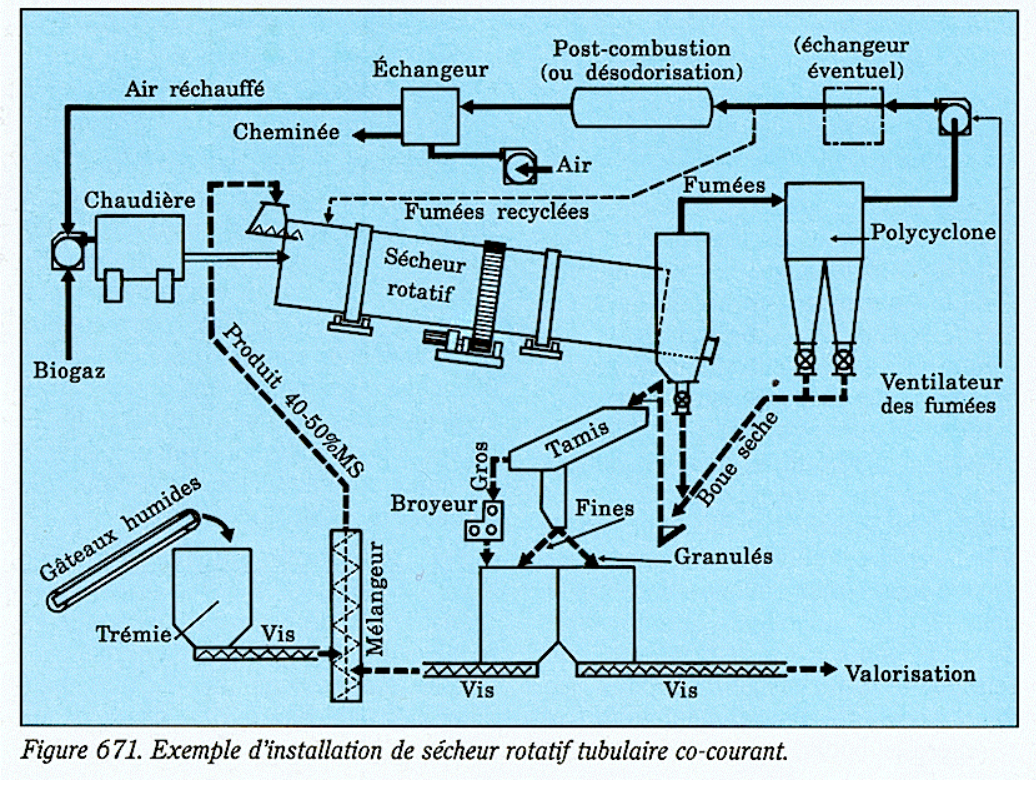


Figure 671. Exemple d'installation de sécheur rotatif tubulaire co-courant.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

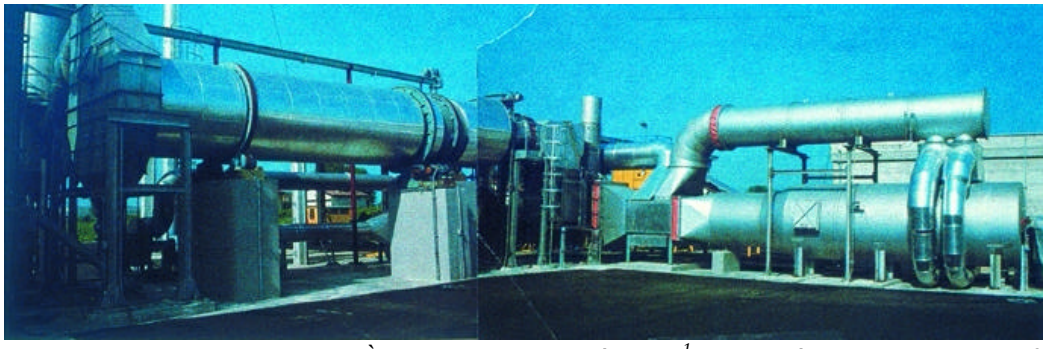


Figure 672. Installation de MODÈNE (Italie). Capacité: 25 t.j^{-1} de MS. Sécheur tubulaire rotatif.

Les gaz chauds peuvent également être désodorisés par voie humide, mais l'installation, importante et multi-étagée, est toujours moins performante qu'une postcombustion.

Dans le sécheur, les gaz chauds circulent dans le sens contraire des boues à sécher (système contre-courant) ou dans le même sens (système co-courant).

Dans le séchage à **contre-courant**, la boue peut être envoyée dans le tambour sous forme d'un sédiment relativement humide (85 à 70 % d'eau). Par contre, les gaz les plus chauds sont en contact avec les boues les plus sèches et il faut donc limiter les températures d'entrée à 400-450 °C.

Le séchage à **co-courant** permet d'utiliser des gaz de combustion à haute température (600-700 °C) mais, pour éviter alors les phénomènes de "croutage" et de collage des boues, il est impératif de procéder à un mélange efficace des boues humides avec du produit sec recyclé, de façon à envoyer dans le sécheur un produit bien émotté dont l'humidité avoisine les 50 %.

L'amélioration de la structure physique de la boue avant séchage (émottage en morceaux de quelques millimètres) est primordiale pour permettre la production de granulés de 2 à 4 mm, durs, facilement stockables et manipulables. A la sortie du sécheur, les boues sont tamisées; les fines et les morceaux grossiers broyés sont recyclés, et les granulés, conservant moins de 15 % de poussières, stockés en vue d'une valorisation agricole, paysagère, ou même énergétique.

La production de granulés en quantité suffisante demande souvent une surveillance très suivie de l'installation et, notamment, un contrôle visuel fréquent du mélange de boues à l'entrée du sécheur.

Les principaux paramètres de fonctionnement sont débit de boue et température des gaz.

Comparativement au séchage indirect, le séchage direct nécessite plus de précautions: risque de fumées malodorantes, pertes calorifiques plus fortes, mise en régime plus lente, bruits, taux de déshydratation peu modulable (85 à 95 % MS), dépenses d'énergie un peu plus fortes dans le cas de postcombustion.

Par contre, les unités peuvent présenter des capacités supérieures: évaporation de 4 à 5 tonnes d'eau par heure pour un tambour de 2,2 à 2,5 m de diamètre.

4.3.2.2. Autres sécheurs directs

Sécheur à lit fluidisé : c'est un sécheur à convection, dans lequel les boues émot-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tées constituent un lit fluidisé, plus ou moins épais, au-dessus d'un plancher traversé par un flux de vapeur ou de gaz chauds ascendant bien réparti (orifices, buses, etc.).

La préparation de la boue, avant introduction dans l'enceinte de séchage, est essentielle. Un **fort** recyclage de produits secs dans des mélangeurs-granulateurs adaptés est indispensable pour obtenir des petites mottes de boues (quelques millimètres) poreuses et peu denses. Au fur et à mesure du séchage, les mottes de boues, par perte de densité apparente, sont évacuées hors du sécheur, par trop-plein ou par système mécanique d'avancement

Ce sécheur est le plus souvent prévu couplé à une unité d'incinération. Ces unités requièrent une exploitation vigilante.

Sécheur "flash", dans lequel les boues entrantes, préalablement mélangées à des boues déjà séchées, sont broyées puis projetées dans une cheminée verticale traversée par des gaz chauds à 600-700 °C.

Sécheur à soles étagées (voir page 1028).

4.4. INCINÉRATION

4.4.1. Four rotatif tubulaire

Ce four peut fonctionner soit en sécheur (page 1025), soit en incinérateur.

Le four fonctionne généralement à contre-courant. Toute l'unité fonctionne sous la dépression du ventilateur d'air de combustion. Le contrôle du four est basé essentiellement sur la température des gaz de sortie (300 °C environ).

De par son principe, le rendement thermique intrinsèque est assez bon, mais il faut noter les points suivants

- pertes extérieures par rayonnement assez élevées,
- peu de souplesse vis-à-vis des variations de débit et de siccité (la zone de feu doit être maintenue obligatoirement dans la partie revêtue de réfractaire),
- évacuation de fumées malodorantes et poussiéreuses, nécessitant cyclonage et lavage très soignés (les débits étant importants, il est difficile d'assurer une désodorisation complète),
- cendres récupérées en aval du four assez hétérogènes.

La conduite du four est aisée. Elle doit être de préférence continue, car les mises en régime sont assez longues et les dépenses calorifiques assez importantes à chaque démarrage. La combustion des déchets de grilles est possible avec ce type de four.

4.4.2. Four à soles étagées

Ce type de four est bien adapté au traitement des boues

- **simplicité** dans la conduite de la combustion,
- évacuation de la quasi totalité des **cendres sèches** dans le bas du four. Les fumées de combustion sont donc **très peu chargées,** et il est aisé de procéder à des récupérations thermiques fiables en exploitation et en entretien,
- possibilité d'incinérer des déchets grossiers (refus de grilles, déchets de papeterie...).

4.4.2.1. Four à soles étagées classique

Ce four (figure 673) est constitué essentiellement d'une série de plateaux (1) (ou soles) que le produit parcourt méthodiquement en descendant. Le passage d'une sole à l'autre est réalisé par un ensemble de racleurs rotatifs (2), mus par un arbre central vertical (3) accouplé à un

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

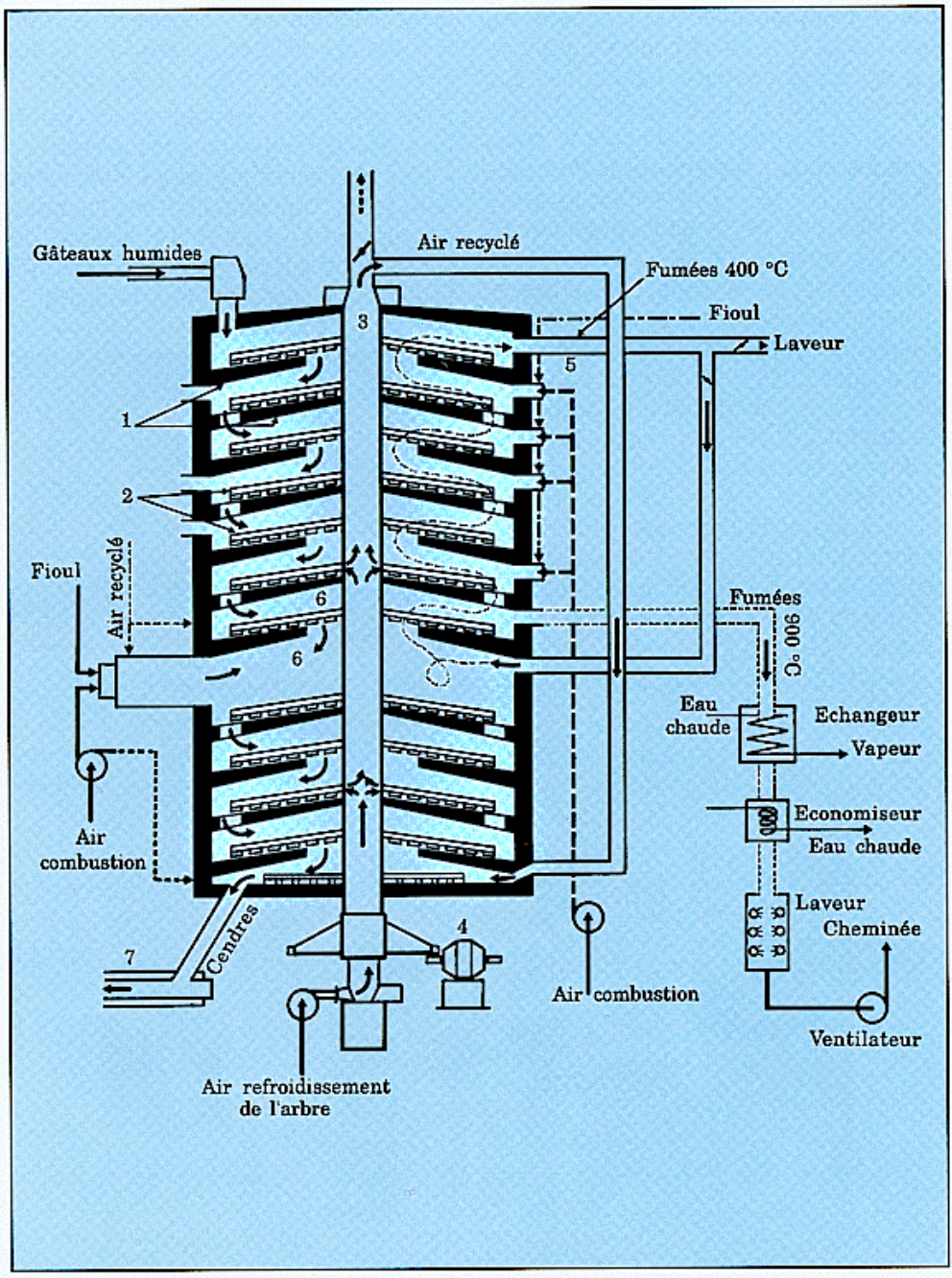


Figure 673. Schéma de principe d'un four à étages (chambre extérieure de préchauffage de l'air ou brûleurs sur soles – postcombustion éventuelle intégrée en zone de combustion).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

groupe d'entraînement (4) extérieur au four. Ce four travaille à contre-courant et a donc un bon rendement thermique. La température de sortie des gaz (5) est voisine de 400-500 °C, et celle de la boue dans les étages supérieurs ne doit pas dépasser 70 °C si l'on veut éviter des entraînements de produits organiques imbrûlés dans les fumées.

Les gâteaux de boue sont donc progressivement séchés dans les trois ou quatre étages supérieurs (jusqu'à des teneurs en eau de 30 à 20 %), et tombent ensuite sur les soles de combustion (6) en atmosphère très oxydante où s'effectue l'inflammation complète des MO (température 750-850 °C).

Les soles inférieures récupèrent les cendres (7). Celles-ci sont partiellement refroidies au contact de l'air comburant, et sont directement évacuées par transporteur à chaînes ou à godets. Selon le dimensionnement du four, un refroidissement extérieur des cendres est parfois nécessaire: vis à auge fermée à double enveloppe de circulation d'eau froide.

Les principaux avantages de ce type de four peuvent se résumer comme suit

- teneur en poussière des gaz de combustion faible: un simple lavage humide (laveur venturi et laveur à plateaux à pulvérisation d'eau) permet de l'abaisser très facilement en-dessous de 150 mg.Nm^{-3},

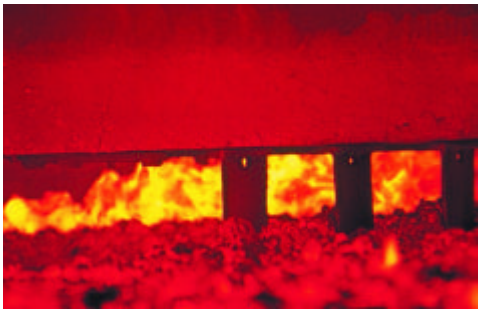


Figure 675. Sole de combustion des MO.

Figure 674. Installation de BERGISCH-GLADBACH (RFA) pour les papeteries ZANDERS. Incinération des boues par four à soles étagées (7) Ø 5,1 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- bilan thermique acceptable du fait
- d'un fonctionnement stable (peu de sensibilité aux variations de débit et longtemps de séjour des matières dans le four - 3 à 4 h),
- de la recirculation de l'air de refroidissement de l'arbre central,
- du réchauffage partiel des gaz dû au refroidissement des cendres dans la partie basse du four,
- du fonctionnement à contre-courant (pertes moins importantes par la chaleur sensible des fumées),
- fonctionnement stable à des charges très inférieures à la charge nominale (jusqu'à 30 %). Le bilan thermique est alors un peu pénalisé, mais le four peut être exploité en continu,
- consommation d'énergie électrique relativement modérée,
- possibilité d'incinérer à des températures relativement basses (750-800 °C) pour éviter les surfusions de certaines cendres provenant de boues industrielles,
- régulation souple et peu sophistiquée variations importantes possibles du débit d'air, réglage aisé des températures par action sur les brûleurs de soles ou sur la température de l'air comburant en cas de chambre extérieure de préchauffage de l'air,
- peu de précautions à prendre pour l'alimentation en boue (un simple transporteur à chaînes suffit pour l'émottage des gâteaux de filtre-presse).

Par contre, des contraintes subsistent

-grande inertie thermique imposant une lente mise en régime et un appoint calorifique important au démarrage. Il vaut donc mieux exploiter ce four de façon continue ou tout au moins avec de courts arrêts,

- excès d'air relativement important (50 à 80 %), mais n'aggravant pas le bilan thermique du fait du fonctionnement à contre-courant
- récupération de chaleur peu justifiée (lourd investissement) avec des fumées à basse température (400 °C) mais surtout,
- **risque** de rejeter à l'atmosphère des **fumées malodorantes** de par l'entraînement, inévitable sur certaines boues urbaines ou industrielles, de produits organiques imbrûlés. Une désodorisation efficace nécessite la mise en oeuvre d'une postcombustion à 700-900 °C qui pénalise le bilan thermique: chambre de postcombustion indépendante du four ou intégrée dans le four lui-même.

Les plus grosses unités de four à étages atteignent 8 m de diamètre environ, et peuvent comporter jusqu'à 12 étages. Le **débit d'alimentation** spécifique est de l'ordre de 40 à 60 kg de produit brut par m^2 de surface utile de sole et par heure.

Les plus grosses unités peuvent donc incinérer 15 à 20 tonnes de gâteaux à l'heure, ce qui correspond à des capacités d'évaporation de plus de 10 tonnes d'eau par heure (15 à 25 kg d'eau parmi de surface utile de chauffe et par heure).

Les fours à soles étagées peuvent aussi être utilisés en sécheurs, avec prélèvement latéral des produits secs au niveau de la sole inférieure de séchage. Ils peuvent aussi être mis en couvre

- pour la régénération de CAG (fonctionnement en atmosphère réductrice avec apport de vapeur d'eau),
- pour le recyclage de boues calciques (récupération de chaux vive).

4.4.2.2. Four à soles étagées en pyrolysecombustion

- **Principe de la pyrolyse**

Au sens strict du terme, la pyrolyse (figure 676) consiste en la décomposition, à température élevée (800

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1000 °C), de la matière organique à l'abri de l'oxygène de l'air. Cette transformation donne naissance à

- une phase solide résiduelle, contenant une certaine proportion de carbone (coke) appelé **"carbone fixe",**
- une phase gazeuse contenant vapeur d'eau, CO_2, N_2, gaz combustibles tels que H_2, CH_4, C_2H_4..., CO ainsi que des composés carbonés condensables.

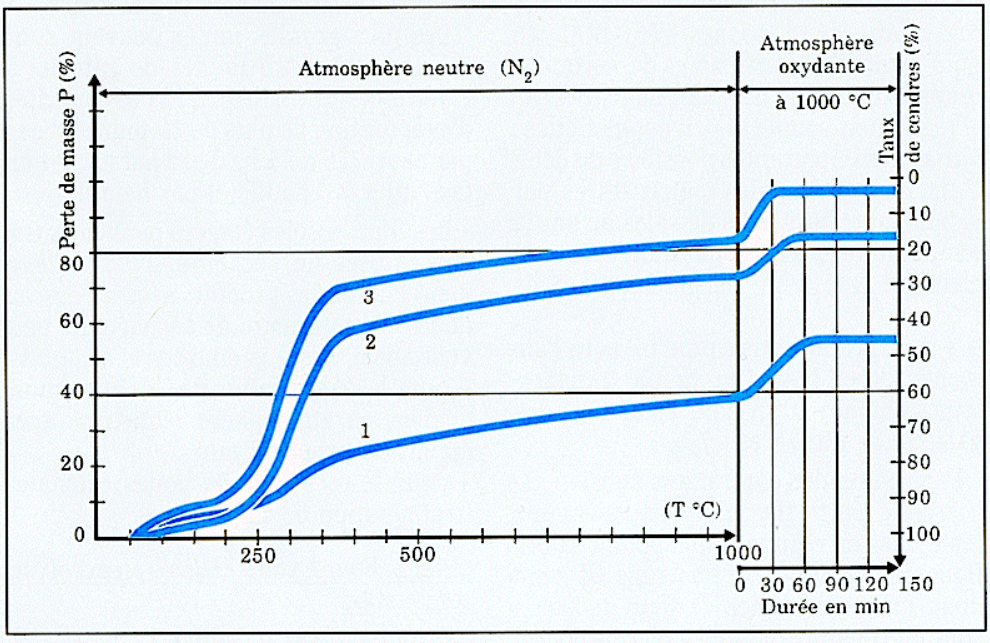
La pyrolyse de boues résiduaires prédéshydratées vise avant tout leur destruction, sans prétendre à une récupération énergétique sous forme de combustible solide. La technique pratiquée est donc notablement différente des procédés de pyrolyse industrielle sur pétrole ou charbon. De plus, la qualité du produit brut est différente: présence d'oxygène (30 % des MO environ) et humidité relativement importante.

- **Pyrolyse-combustion**

La pyrolyse-combustion des gâteaux de boues correspond au séchage et à la pyrolyse préalable de la matière organique, en utilisant la chaleur libérée par combustion (en présence d'oxygène) de la partie non gazéifiée du carbone organique.

Le four à étages se prête très bien à ce procédé du fait du lent cheminement du produit du haut vers le bas

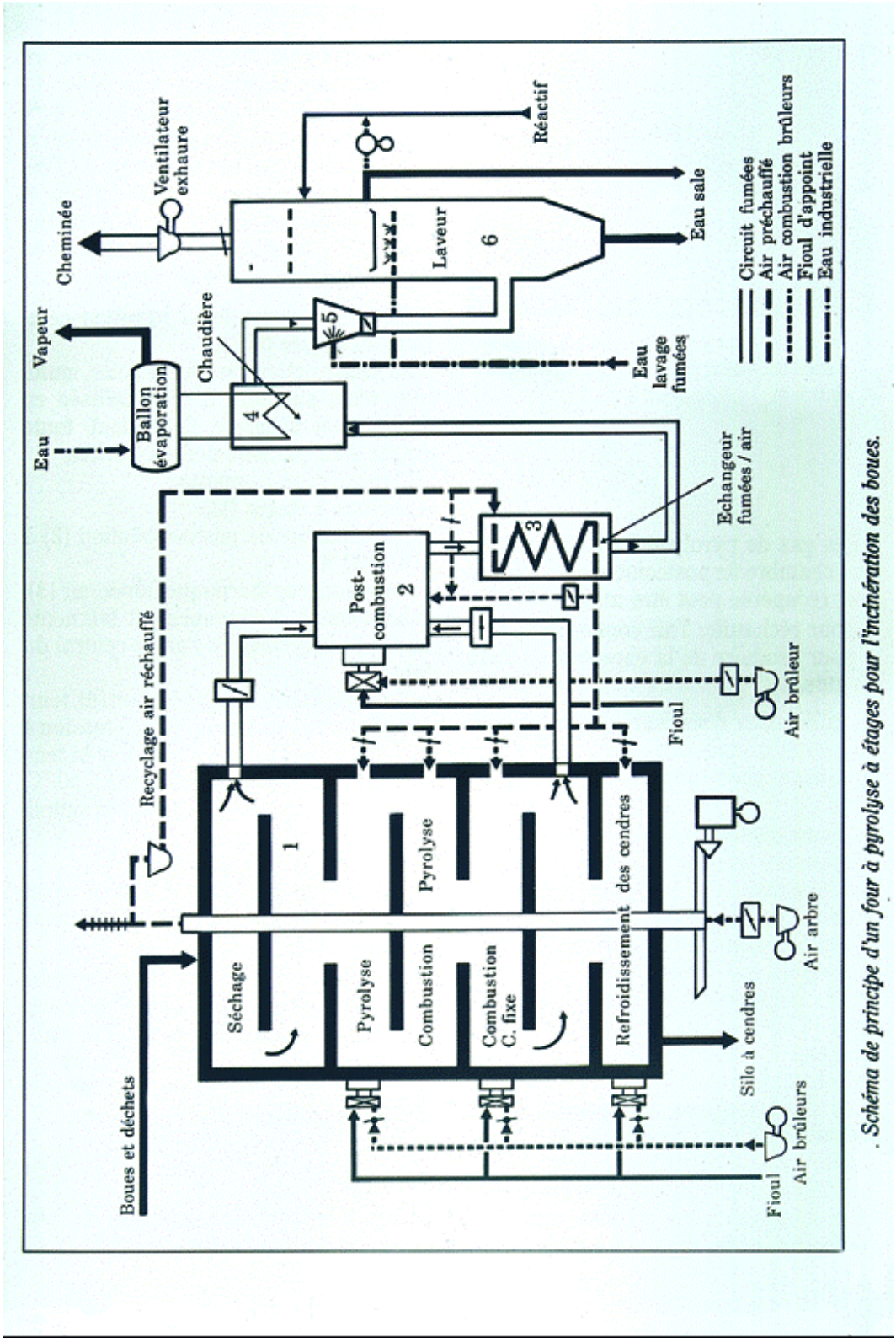
- séchage des gâteaux,
- échauffement progressif de la matière organique,
- pyrolyse des matières volatiles en atmosphère pauvre en O_2 grâce à l'apport de chaleur venant des soles inférieures, - combustion des pyrolysats ("carbone fixe"), voire utilisation d'énergie extérieure au système, pour apporter la chaleur nécessaire dans les étages supérieurs.



1 - Boues. 2 - Papier. 3 - Bois.

Figure 676. Diagramme pyrolyse-combustion obtenu en thermo-balance de laboratoire sous azote puis oxygène.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



. Schéma de principe d'un four à pyrolyse à étages pour l'incinération des boues.

. Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

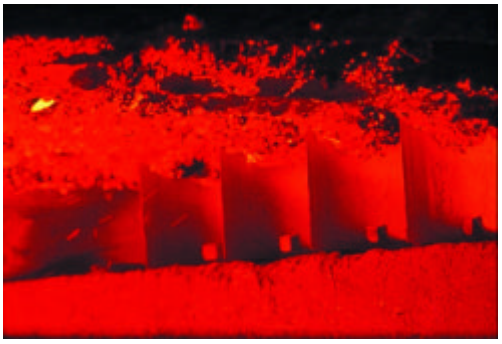


Figure 678. Zone de combustion du carbone fixe dans un four à soles étagées à pyrolysecombustion.

Les gaz de pyrolyse sont brûlés dans une chambre de postcombustion. La chaleur récupérée peut être utilisée

- pour réchauffer l'air comburant,

- pour produire de la vapeur et de l'eau chaude.

L'utilisation d'un four à soles étagées en pyrolyse-combustion est certes plus complexe, mais présente divers avantages

- **risque d'odeurs supprimé,** du fait de la montée en température des fumées en postcombustion (750-900 °C) en atmosphère oxydante,

- récupération énergétique facilitée sur l'enthalpie des fumées: peu de poussières (échangeurs thermiques performants et très fiables en exploitation) et température élevée des fumées,

- réduction importante du taux d'excès d'air de combustion nécessaire. Le taux d'excès d'air peut descendre à 15-20 %, améliorant le bilan thermique. Certaines législations imposent cependant un taux d'oxygène relativement fort dans les fumées, d'où l'obligation de fonctionner alors à des taux d'excès d'air supérieurs aux limites permises par le procédé,

- réduction du volume des fumées: d'où dimensionnement plus faible des fours et des laveurs. Cependant, le coût de l'ensemble reste supérieur à celui d'un four à étages classique, du fait de la postcombustion, de la récupération de chaleur et de la régulation plus sophistiquée.

- **Mise en oeuvre de la pyrolyse-combustion** (figure 677).

La construction du four à soles multiples reste similaire à celle utilisée en combustion intégrale. Cependant, toute entrée d'air parasite doit être évitée.

L'installation comporte -un four à étages (1),

- une chambre de postcombustion (2) à 750-900 °C,

- un échangeur thermique fumée/air (3), généralement à rayonnement (alimenté en air de recyclage de l'arbre central du four),

- une chaudière de récupération (4), fournissant de la vapeur moyenne pression à 15 bars, et permettant d'abaisser la température des fumées à moins de 300 °C, - un ensemble de lavage de fumés simplifié comportant:

- un laveur Venturi (5),

- une tour de lavage (6) avec ajout éventuel d'agents chimiques pour neutraliser SO_2, HF, etc.

L'ensemble du four fonctionne en autorégulation avec contrôles de: températures et taux d'oxygène des fumées, pression-dépression des circuits, réchauffage d'air comburant, soutirages des fumées à différentes soles.

4.4.3. Four à lit fluidisé

Le four à lit fluidisé présente les avantages principaux suivants

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 679. Four à lit fluidisé.

- **désodorisation totale** des fumées, qui quittent toujours l'enceinte d'incinération à des températures très élevées (850-900 °C),
- absence d'organes mécaniques en mouvement en contact avec les gaz chauds,
- fonctionnement avec des taux d'excès d'air relativement bas (de l'ordre de 40 dans la pratique),
- exploitation possible en discontinu.

Le four à lit fluidisé s'adapte très bien à des arrêts de nuit, avec de faibles consommations de combustible d'appoint lors du redémarrage, par suite

- du faible volume et du caractère confiné de la chambre d'incinération,
- du volant calorifique important de la masse réfractaire et de la masse de sable.

Les temps de mise en régime, qui doivent rester compatibles avec la mise en température prudente du revêtement réfractaire, sont relativement courts.

4.4.3.1. Principe du lit fluidisé

Un four à lit fluidisé (figure 680) estune enceinte verticale fermée, de forme généralement cylindrique, contenant un **lit de sable très chaud** (750-850 °C), maintenu en suspension par un courant d'air ascendant injecté à sa base, au travers d'une **grille de répartition** munie de multiples diffuseurs.

La hauteur du lit de sable, au repos, varie entre 0,5 et 0,8 m. Les boues sont injectées dans le lit lui-même (vis ou pompe gaveuse), ou introduites par la partie supérieure du four. Le lit de sable a un rôle thermique et mécanique

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

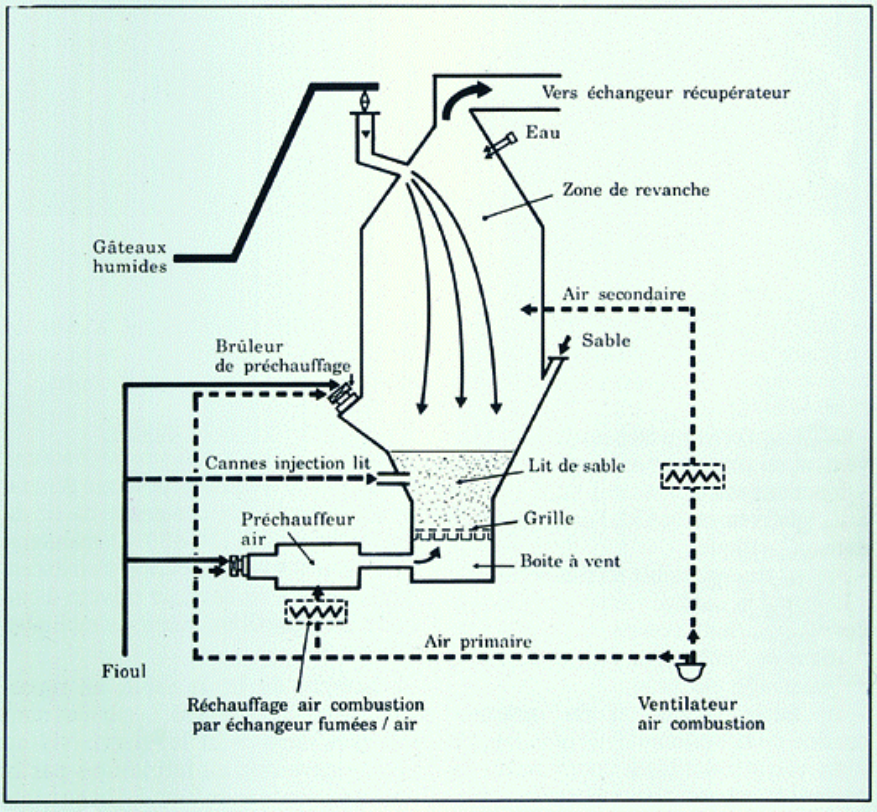
(désagrégation des mottes de gâteau déshydraté). Le débit d'air doit assurer à la fois la fluidisation du matériau et l'apport d'oxygène nécessaire à la combustion, mais ne doit pas causer d'entraînement de sable. De ce fait, le débit d'air traversant la grille n'est réglable que dans des limites assez étroites.

Dans le lit de sable, se produisent séchage et gazéification. Une partie, plus ou moins importante, des matières fines séchées et des matières volatiles, achève sa combustion dans la zone de revanche située au-dessus du lit fluidisé, où la température, voisine de 900 °C, est supérieure de 100 à 150 °C à celle qui règne dans le lit (injection souvent possible d'air supplémentaire, dit "air secondaire" au niveau de cette zone de revanche).

La répartition, sur toute la surface du lit, du débit de boues, et celle de l'apport calorifique éventuel, doivent être d'autant plus soignées que la boue à brûler est humide.

L'apport éventuel d'énergie extérieure peut s'effectuer de différentes manières

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



Principe d'un lit fluidisé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- chambre de préchauffage de l'air de combustion, avant envoi dans **la boite à vent** sous la grille,
- brûleur d'appoint et (ou) de démarrage, situé au-dessus du lit de sable,
- lances d'injection directe dans le lit (fioul, gaz, ou même huiles usagées).

La totalité des matières brûlées se retrouve sous forme de **cendres volantes dans les fumées**, qui sortent du four à 800-900 °C. La récupération de ces cendres minérales peut s'effectuer de plusieurs manières

- **évacuation à sec**, par filtre électrostatique précédé d'un ou plusieurs refroidisseurs (voir figure 681),
- **évacuation sous forme humide**
- cyclonage (après refroidissement), suivi d'un lavage humide (venturi, scrubber, dispositif à rideau d'eau ou tour de lavage à plateaux à contrecourant..),
- lavage humide seul (après échangeur) suivi d'un lagunage, d'un épaississement statique, ou encore d'un multicyclonage des eaux cendreuses chargées à 1-4 % MES.

Le caractère thixotropique du produit peut causer certaines difficultés d'évacuation si un taux minimal de siccité n'est pas atteint

4.4.3.2. Mise en oeuvre

La technique du lit fluidisé impose certaines précautions.

- **Récupération de chaleur**

La récupération sur les fumées, nécessaire à un bon rendement thermique, est appliquée:

- **pour réchauffer l'air de combustion**. La température de cet air réchauffé doit être compatible avec la résistance thermique de la grille de fluidisation (tempé

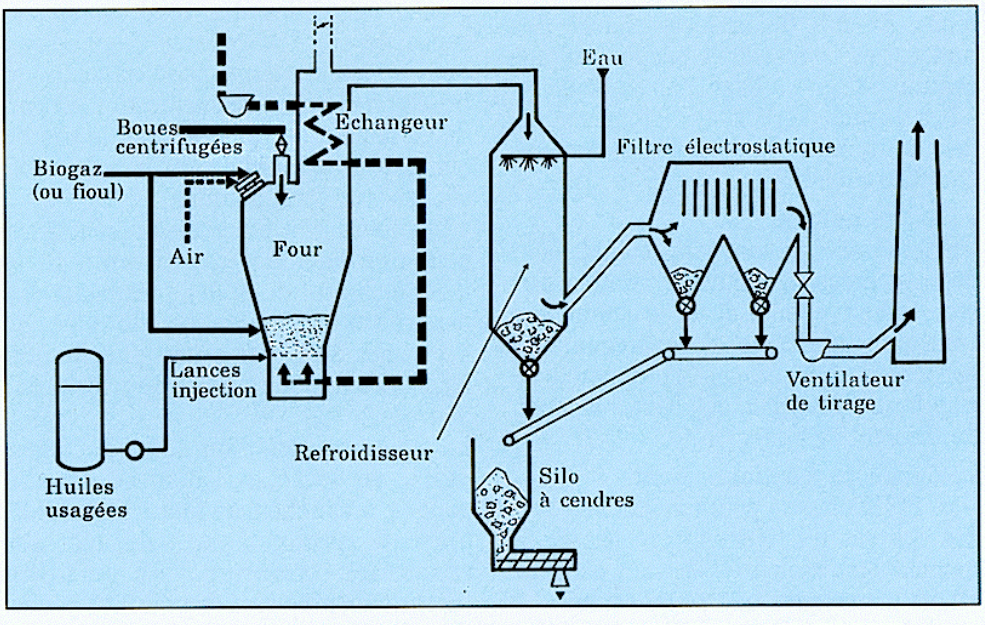


Figure 681. Installation de ROCHE (Suisse) pour les villes de VEVEY et MONTREUX. Incinération des boues. Schéma de l'installation avec four à lit fluidisé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ratures d'air réchauffé entre 450 et 650 °C),

- **pour produire de la vapeur**. Celle-ci, comme dans le cas d'un four à étage muni d'une postcombustion, peut être facilement réutilisée dans un présécheur de boues (§ 4.3.1). La vapeur peut également être réutilisée pour un conditionnement thermique des boues.

La combinaison sécheur-four est intéressante car elle permet d'améliorer

- le bilan thermique global de l'installation (incinération possible de gâteaux plus humides),
- la capacité du four, car, avec des boues plus sèches, le volume de fumées est moins important,
- **pour produire de l'eau chaude**, par mise en place d'un économiseur à l'aval des récupérateurs précédents (chauffage bâtiments, digesteurs, etc.).

Il faut apporter un **soin tout particulier** aux choix de la technologie des récupérateurs, du fait de la forte charge des fumées en poussières (dépoussiérage continu par grenaillage, par exemple).

Les circuits de récupération thermique des fours à lit fluidisé nécessitent un entretien attentif.

- **Lavage humide**

Si les fumées ne sont pas préalablement dépoussiérées, leur lavage humide doit être étudié avec soin, de façon à réduire la formation de dépôts et concrétions, en particulier dans le cas d'utilisation de trop fortes quantités de chaux en conditionnement de boue.

- **Régime de fonctionnement**

Le lit fluidisé ne peut fonctionner qu'à des charges relativement proches de la nominale (au moins 70 %), sous peine de bilans thermiques très pénalisants.

Les dépenses d'énergie électrique d'un lit fluidisé sont relativement élevées, car la pression de l'air de fluidisation doit vaincre les pertes de charges de la grille et du lit de sable.

Le lit fluidisé peut accepter des variations de qualité de boues mais, du fait du faible temps de séjour des matières dans le four, une régulation relativement fine des températures, pressions-dépressions, taux d'oxygène, est indispensable.

- **Introduction de déchets**

La combustion de déchets volumineux (en particulier refus de dégrillage) n'est guère envisageable, sauf sur certains fours à trémie d'alimentation par le dessus.

Par contre, les graisses de prétraitement (de préférence homogénéisées et préchauffées) peuvent être introduites facilement.

- **Fusion des cendres**

Selon les caractéristiques des boues à traiter, il faut prendre garde aux surfusions éventuelles des cendres en présence de silice (formation de fondants pouvant aboutir à une prise en masse du lit). Ce phénomène de vitrification est particulièrement à craindre dans le cas de boues de forte salinité (présence de Na, K, etc., en trop forte quantité).

Des fours à lit fluidisé sont construits pour des diamètres supérieurs à 10 m (plus de 90 m^2 de grille), présentant des puissances d'évaporation de plus de 25 tonnes d'eau par heure (plus de 300 kg d'eau par m^2 de surface de grille et par heure).

La combinaison d'un four à étages, utilisé en sécheur et disposé dans la zone de revanche d'un four à lit fluidisé, présente certaines particularités intéressantes : amélioration du bilan thermique, plus grande stabilité, réduction des dimensions de la chambre de combustion.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 682. Facility at Pernis, the Netherlands, for Shell. Complex refinery. Fluidised bed furnace. Capac ity: 8.5 t.d^{-1} of dry solids.

Figure 682. Installation de PERLAIS (Pays-bas). pour SHELL. Raffinerie complexe. Four à lit fluidisé. Capacité: 8,5 t.j^{-1} de MS

4.4.4. Four à pulvérisation

La boue est préséchée avant injection. Ces fours sont prévus avec une simple enceinte, revêtue de réfractaire, équipée uniquement d'un brûleur à poudre.

Ces projets d'installation nécessitent de sérieuses précautions, en particulier lorsque les fumées sont recyclées directement dans le circuit de séchage ("boucle thermique")

- sécurités sur les circuits de poussières (boue séchée) pour éviter retour de flamme et explosion,
- régulation très complète, à temps de réponse très court,
- grande régularité de la qualité des boues (PCI et humidité).

La pulvérisation de boues humides est également possible (à 15-2 0 % de siccité) grâce à des brûleurs spécialement étudiés. Dans ce cas, les débits sont faibles, et il est utile de disposer de calories à bon marché (fumées chaudes de four d'OM).

4.4.5. Boues et ordures ménagères

Les boues et les OM, étant des déchets produits par la même collectivité, il est souvent raisonnable d'étudier les possibilités de leur traitement combiné. La figure 683 résume les différentes filières conjointes.

La **décharge** est parfois difficile à exploiter si les gâteaux ne sont pas de consistance solide (gâteaux de filtre-presse par exemple).

Le **compost,** affiné par tamisage, connaît encore trop souvent des problèmes de débouchés.

Par contre, la combustion des OM permet de disposer de calories excédentaires (1200 à 2 000 kcal.kg^{-1} d'OM brutes), pouvant combler le déficit de la combustion des boues (500 à 800 kcal.kg^{-1} de gâteau). Ce traitement couplé des boues et des OM nécessite toutefois de respecter certains choix technologiques

- le procédé le plus simple d'incorporation directe des gâteaux de boues dans la fosse de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

réception des OM est à proscrire (comportement plastique et mélange non homogène),

- l'injection directe de gâteaux de siccité suffisante (> 50 % MS) au-dessus du foyer du four d'OM est réalisable, mais un système émotteur et propulseur adapté doit être mis en oeuvre, et les débits atteints demeurent modérés,

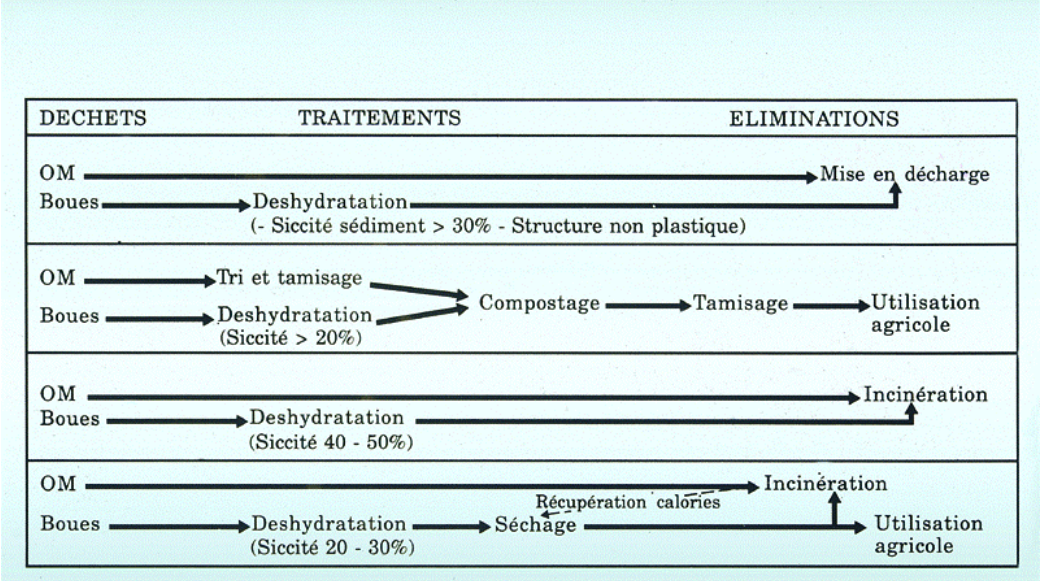
- l'injection de boues épaissies (10-15 % MS) au moyen de pulvérisateurs spécifiques a connu un développement limité. Les débits de boues traités sont alors très modestes,

- l'une des voies les plus prometteuses est la récupération des calories excédentaires pour le séchage préalable des gâteaux de boues (siccité 20-30 % MS)

- récupération de gaz chauds sur un sécheur direct, avec renvoi, dans le foyer du four, des fumées de séchage. Il y a alors dépendance totale du four et du sécheur, et il est difficile d'harmoniser parfaitement les variations quantités de boues et d'OM tout au long de l'année,

- récupération de vapeur pour alimenter un sécheur direct. Ce couplage est plus souple en exploitation. Les boues séchées sont envoyées, en cas d'incinération, dans le foyer même du four OM (voie pneumatique) ou dans la trémie d'alimentation (séchage partiel à 70-80 % MS pour éviter les poussières).

Un projet de couplage boues/OM demande une étude économique sérieuse: stockage et transport des boues déshydratées, proportions possibles entre boue et OM par éq. hab. et par jour (production moyenne de 1 kg OM pour 2 1 de boue épaissie), politique d'implantation rapprochée des deux unités, bilan thermique, secours énergétique pour découpler les deux exploitations en cas de nécessité.



Filières de traitement commun boues-OM.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. AUTRES TRAITEMENTS DES BOUES DÉSHYDRATÉES

5.1 COMPOSTAGE

La mise en décharge des boues déshydratées (généralement avec les OM), ou leur valorisation directe en agriculture, restent encore souvent le mode d'évacuation finale le moins onéreux. Dans certains cas, cependant, cela pose des problèmes aux exploitants de stations d'épuration ou de décharges, ainsi qu'aux agriculteurs

- difficultés de stocker, de manipuler, de transporter des gâteaux de boue collants, à texture plastique (aux siccités couramment rencontrées entre 15 et 25 %). Cette structure pâteuse des boues gêne également le fonctionnement des compacteurs de décharge et des épandeurs,
- réticence liée à la présence de germes pathogènes, d'odeurs et à l'aspect de certaines boues.

Le compostage des boues déshydratées avec un support carboné structurant permet, certes avec des investissements supplémentaires, de faciliter l'évacuation des boues résiduaires organiques:

- fabrication d'un **produit "sec"** n'exigeant pas une déshydratation préalable poussée. La boue, de structure solide, est alors stockable très aisément sur de longues périodes. Le compost peut, à la limite, être dirigé vers des décharges ne recevant que des produits de siccité élevée,
- obtention d'un **amendement organique humifié**, hygiénisé et commercialisable: maraîchage, horticulture florale, pépinières, viticulture, sylviculture, restructuration de sols érodés, redispersion sur grandes cultures si la teneur en métaux lourds est acceptable.

La commercialisation du produit fini nécessite une sérieuse étude préalable de marché, ainsi qu'une source proche, abondante, peu coûteuse, de support carboné.

5.1.1. Principes et conditions d'exploitation

Le compostage est la décomposition et la stabilisation, par voie biologique aérobie thermophile, de substrats organiques contenus dans des déchets solides (figure 684).

Cette dégradation, par des micro-organismes divers (figure 685), s'accompagne d'une élévation de température pouvant atteindre 70 'C: il y a alors **destruction des germes pathogènes et diminution de l'humidité du produit**.

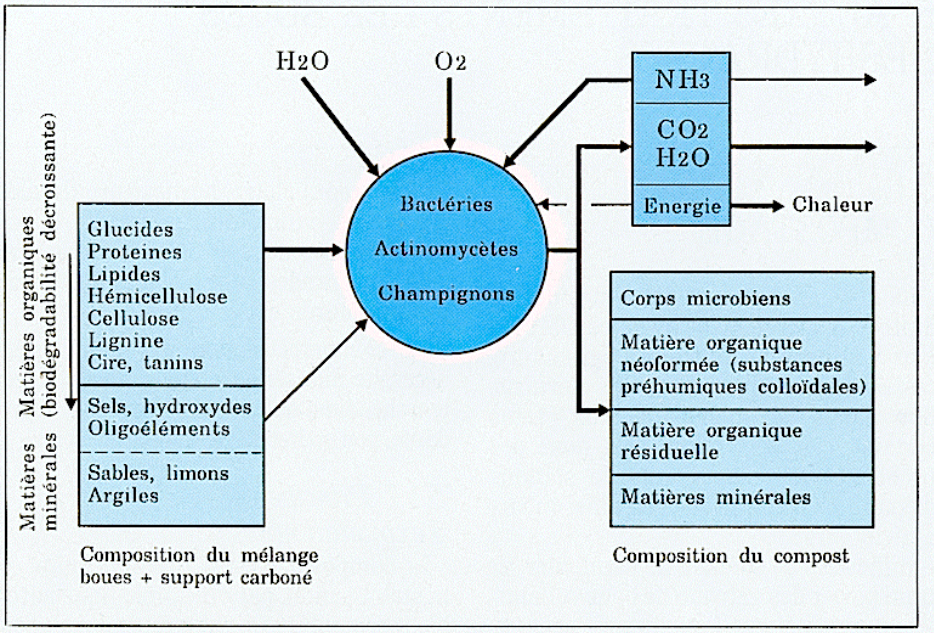
Le compostage s'applique de préférence à des boues fraîches (riches en MO et en azote), mais peut également être appliqué à des boues digérées ou stabilisées aérobies.

Le stockage et la manutention des boues déshydratées non stabilisées doivent faire l'objet de précautions spéciales.

Les **conditions de milieu** propres au compostage sont les suivantes

- la **microflore** existe à l'état naturel dans les boues. Un ensemencement est donc superflu,
- le **pH** n'est pas un paramètre fondamental pour le bon déroulement du

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



42

Figure 684. Évolution des MO au cours du compostage.

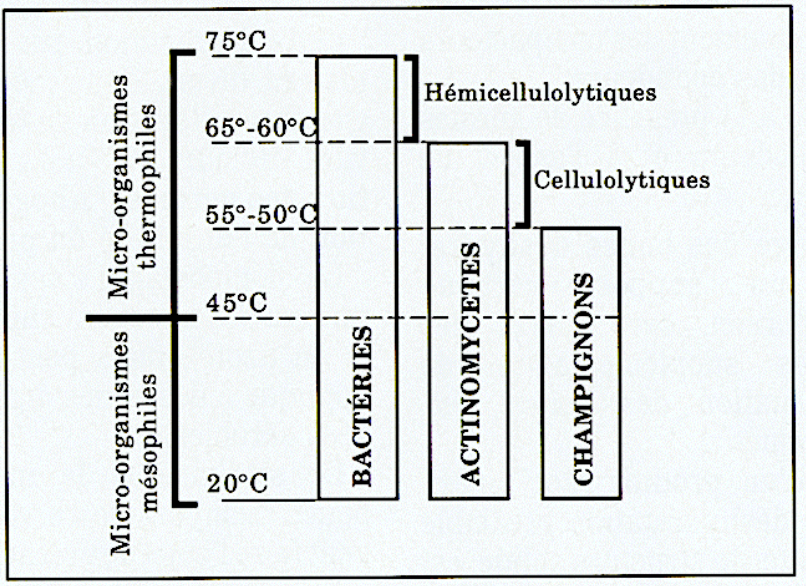


Figure 685. Micro-organismes actifs au cours du compostage.

compostage, puisqu'il s'ajuste très rapidement entre 6,5 et 8 (acidification en début de compostage, puis alcalinisation par formation d'ammoniac et élimination du CO_2 par l'aération). Même des boues de traitement physico-chimique d'ERU peuvent être compostées,

- le **taux d'humidité** optimal de départ se situe entre 55 et 65 %,
- le **bilan thermodynamique** doit per-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

mettre à la fois le compostage et le séchage partiel par évaporation. L'évaporation peut nécessiter plus de 80
des besoins en énergie du compostage. Il faut maintenir la plupart du temps le rapport poids d'eau/MO dégradables inférieur à 10,

- **l'aération** ne peut être efficace que si le milieu est perméable à l'air. Les boues déshydratées ayant souvent une très faible porosité, il est **indispensable** de leur apporter un agent de foisonnement, généralement représenté par le support carboné (minimum 20 % de vide à atteindre dans le mélange).

L'aération permet d'apporter l'oxygène pour l'oxydation biologique, mais aussi d'évacuer la vapeur d'eau dégagée dans la masse de compost. La déshydratation par circulation d'air est d'autant plus efficace que les conditions climatiques sont bonnes.

- **Équilibres nutritionnels**

Le rapport C/N règle toute la dynamique microbienne. Au début du processus de compostage, C/N doit se situer aux alentours de 30. Le C/N des boues (de l'ordre de 10) est donc à rééquilibrer avec une source carbonée de C/N élevé (260 pour les sciures). Les autres éléments (P, Ca, Mg, oligo-éléments) sont présents en quantité suffisantes dans les boues.

5.1.2. Choix du support carboné

Le support joue plusieurs rôles

- agent de foisonnement (des agents de foisonnement non organiques, tels que pneus déchiquetés ou morceaux de plastique, sont aussi utilisés et récupérés après criblage),
- amendement carboné,
- éponge, pour absorber une partie de l'humidité des boues, et améliorer leur structure.

Toute une gamme de supports organiques est utilisée: sciure (très répandue)
mais aussi copeaux ou plaquettes de bois, écorces broyées, paille hachée, marc de raisin, anas de lin, rafles de maïs, éventuellement ordures ménagères triées
Pour diminuer les frais d'achat du support carboné, il est de plus en plus procédé:

- à un recyclage de compost partiellement déshydraté,
- à une récupération par criblage des supports grossiers (copeaux, écorces, etc.).

L'humidité de départ des boues déshydratées fixe les quantités de support à mettre en oeuvre: pour un gâteau à 2 0 de siccité, il faut de l'ordre de trois volumes de support (frais, recyclé ou produit composté) pour un volume de boue.

5.1.3. Maturation

Après tout compostage (plus ou moins long selon la technique mise en oeuvre) il est nécessaire, avant utilisation en agriculture, de stabiliser le mélange par une période de maturation (généralement en andains) de deux à trois mois, au cours de laquelle le produit est retourné périodiquement. Le rapport C/N et le pH diminuent, l'azote se nitrifie. C'est au cours de cette période que s'ébauche le phénomène d'humification.

5.1.4. Principaux procédés de compostage des boues

Ils peuvent se regrouper en deux catégories

- **à l'air libre**

- en andains, avec des retournements mécaniques par des machines appropriées.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

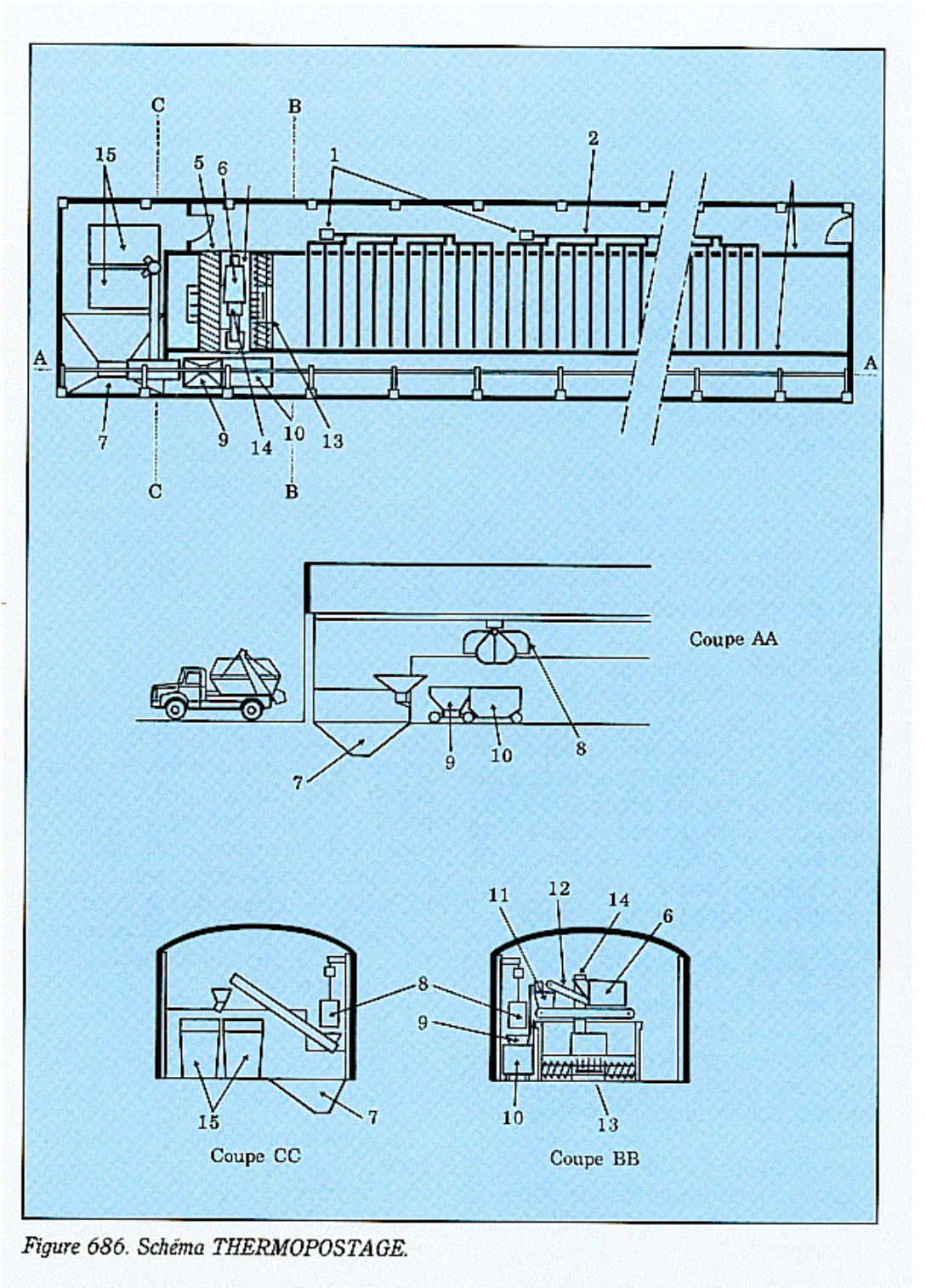


Figure 686. Schéma THERMOPOSTAGE.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **par aération forcée (air soufflé ou aspiré)**

- compostage en tas aéré,

- compostage accéléré (en dix jours environ, de façon continue ou discontinue) dans des réacteurs fermés: cellules verticales en béton, cylindres tournants, etc.

5.1.5. Le THERMOPOSTAGE

(figure 686)

Il reprend la technique du tas aéré et permet d'assurer un compostage et un séchage bien maîtrisés, tout en limitant les investissements.

Le réacteur de compostage est constitué d'une **cellule unique** parallélépipédique de 5 ou 10 m de large pour 2,5 m de haut environ. La longueur de la cellule peut atteindre près de 100 m. Le réacteur peut être placé sous bâtiment. La cellule est mise en dépression par une série de ventilateurs (1), aspirant l'air au travers d'un réseau ramifié (2) noyé dans le radier de la cellule.

Les murs latéraux (3) de la cellule sont en béton et supportent un chemin de roulement pour le déplacement d'un **pont mobile** (4) automoteur à vitesse variable.

Sur ce pont mobile, sont fixés les éléments principaux suivants

- un **mélangeur-disperseur** (5), mélangeant les gâteaux de boue déshydratée au support carboné grossier (frais ou recyclé). Le mélange, émietté, tombe dans la cellule pour former l'andain,

- un **tambour-cribleur** (6), alimenté, depuis la cellule, par un grappin haveur récupérant le produit fini et séparant le support carboné grossier du **produit fin thermoposté.**

Pendant le compostage, qui dure environ quatre semaines, la maîtrise des fermentations et du séchage est assurée par régulation du débit d'air aspiré à travers le tas en fonction de sa température et du temps de réaction. Les consommations de support carboné, grâce au recyclage, sont réduites. La siccité du produit fini atteint 55 % voire plus (60-65 %) si certaines conditions sont adoptées en fin de compostage, notamment celles d'aération des andains.

5.1.6. Le réacteur TRIGA

C'est un grand réacteur de compostage accéléré, fermé, associant aération forcée et retournements fractionnés (figure 687).

Le mélange boue déshydratée et support carboné, bien homogénéisé est envoyé par transporteur (1) jusqu'au sommet du réacteur. Ce dernier est constitué d'une tour verticale cylindrique (2), en béton armé, divisée en quatre cellules égales. Un passage circulaire libre, commun à ces quatre cellules, est aménagé à la base du réacteur pour permettre la rotation complète de la vis inférieure (3) d'extraction et l'admission de l'air.

La vis d'extraction (3), déplacée par un chariot à moteur hydraulique puissant (4), évacue le produit vers le centre de la tour (5) pour tomber sur un tapis transporteur (6). La fonction de la vis est double

- retournement: le produit en cours de compostage est alors renvoyé en haut de la cellule, ce qui permet détassage et aération,

- évacuation du produit fini composté pour envoi sur l'aire de maturation.

L'air est aspiré de bas en haut par quatre surpresseurs (7) (un par cellule) (contrôle de la teneur en O_2, de la température). Les vapeurs peuvent être condensées et lavées (pour l'ammoniac surtout).

Le déroulement des différentes phases (remplissage, retournement, extraction) est automatisé. La figure 689 représente une installation complète.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

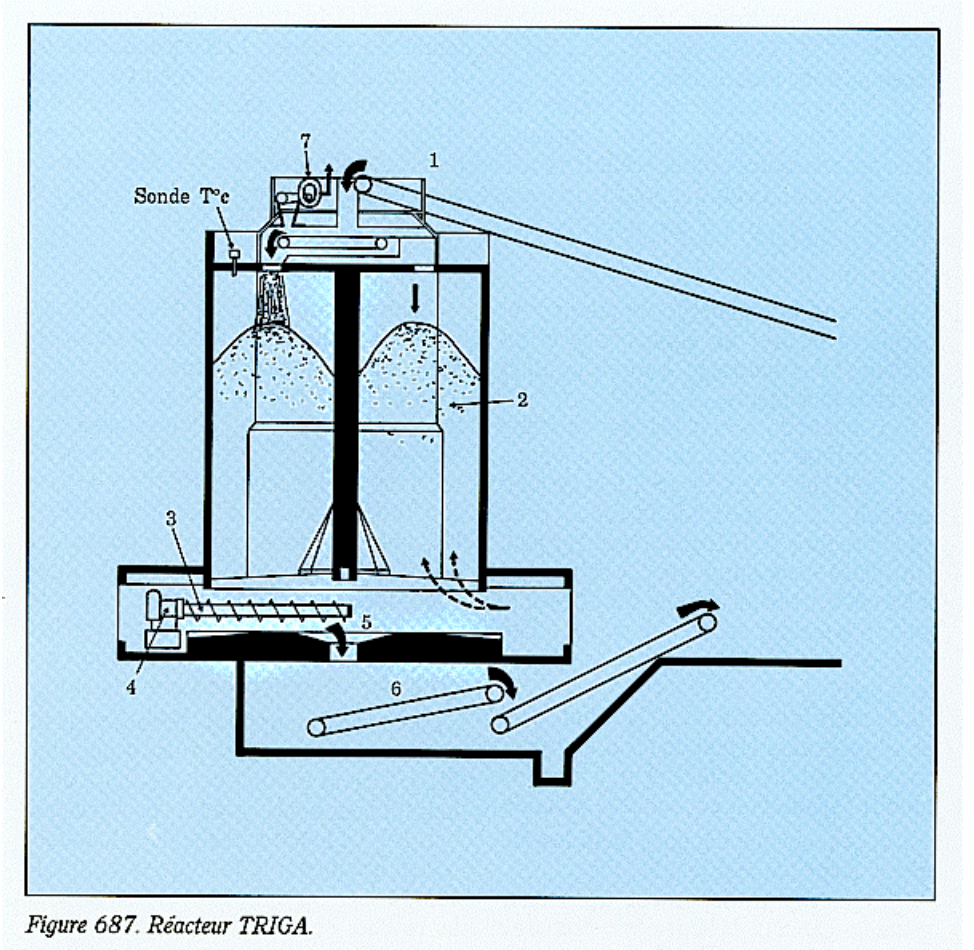


Figure 687. Réacteur TRIGA.

5.2.
DIVERS

On peut citer aussi d'autres traitements mis en oeuvre, essentiellement à titre expérimental.

5.2.1. Valorisation des boues par vermiculture

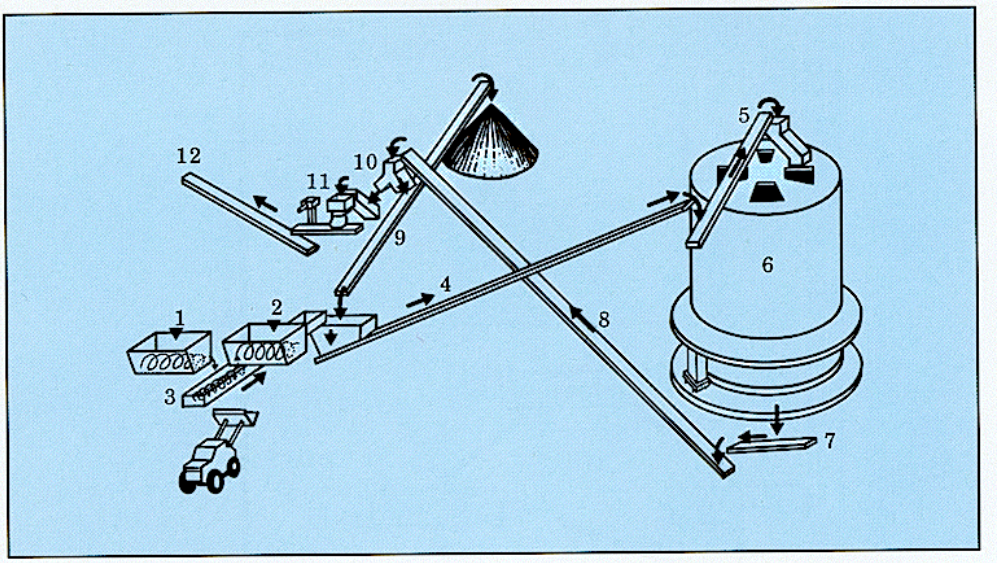
(encore appelée lombricompostage).

C'est l'élevage du ver de terreau sur des gâteaux de boues, mélangés éventuellement aux déchets graisseux de la station d'épuration. Les vers croissent aux dépens de la matière organique, qui se stabilise en un produit dénommé "lombri-compost".

De nombreuses précautions techniques doivent être prises, carles vers sonttrès sensibles au manque d'oxygène, au *froid,* aux fortes chaleurs, au manque d'humidité...

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 688. Installation de SAINT-PALAIS (Gironde) pour le syndicat de la presque d'ARVERT. Capacité: 9 000 t de gâteaux par an. 2 tours de compostage TRIGA.



1 - Réception des produits hydrocarbonés.
2 - Réception des boues.
3 - Mélangeur.
4 - Transporteur d'alimentation du réacteur.
5 - Transporteur de reprise et goulotte pivotante.
6 - Réacteur.
7 - Transporteur d'extraction du récteur.
8 - Transporteur de retour.
9 - Transporteur à 2 sens de marche (réglage et évacuation).
10 - Goulotte by-pass.
11 - Ensacheuse.
12 - Transporteur-camionneur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 689. Schéma installation TRIGA.

.

Ces exigences conduisent à un élevage en couches minces par andains de plein air (0,4 m de haut pour 1,2 m de large). L'ensemencement est important: 15 000-30 000 vers. par m^2.

L'andain reste en place 6 à 12 mois, puis on sépare la boue "compostée" par criblage des vers.

Il n'y a pas hygiénisation par montée en température.

Le développement technologique du procédé reste cependant à réaliser, en particulier pour améliorer la qualité du lombricompost avec deux contraintes principales: réduction de la main-d'oeuvre et fiabilité des performances (la vermiculture sur boues d'épuration reste biologiquement sensible et le lombricompost n'a pas toujours les qualités désirées).

5.2.2. Production d'huiles combustibles à partir de boues

Générer de l'énergie à partir des boues résiduaires est maintenant chose possible, et démontrée industriellement: méthane, vapeur, gaz haute température, eau chaude... Cette énergie produite doit être cependant immédiatement réutilisée, et sa gestion rationnelle en est d'autant plus délicate.

La génération d'énergie stockable est donc une voie intéressante de futurs

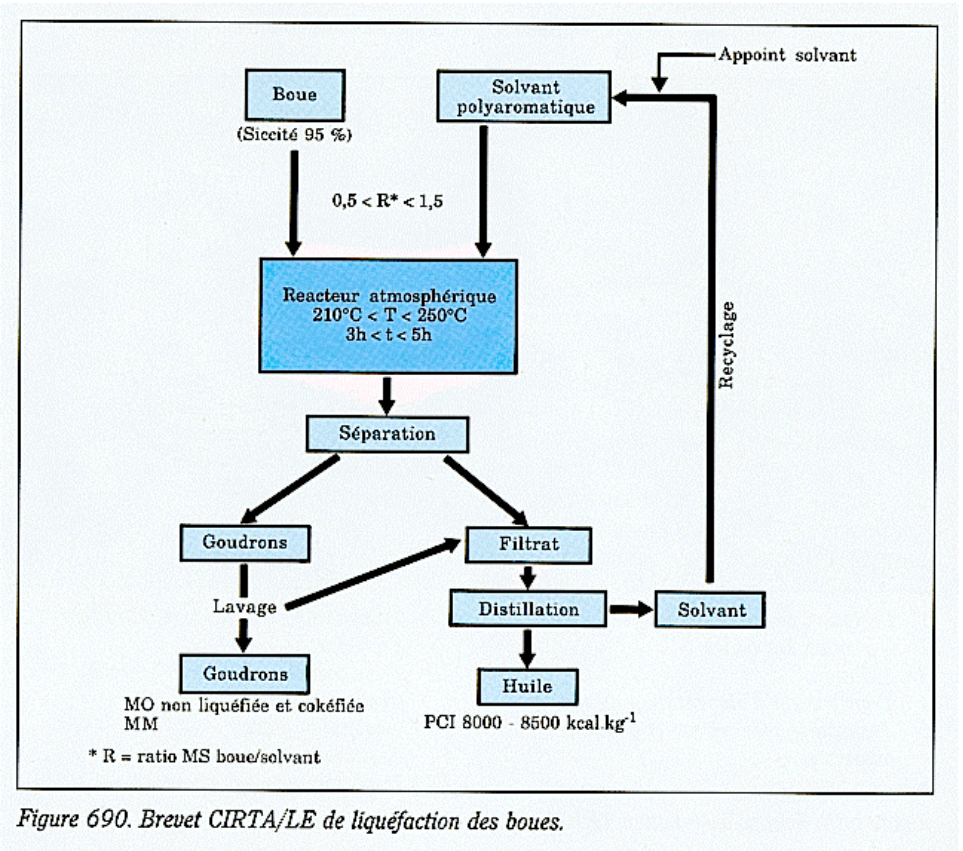


Figure 690. Brevet CIRTA/LE de liquéfaction des boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

développements. Les expérimentations lancées reposent presque toutes sur les réactions de transformation de la matière organique des boues, à haute température et sans présence d'O_2

Les produits de conversion de la matière organique sont des huiles, plus ou moins lourdes, très calorifiques, et des résidus goudronneux (carbonisation) également calorifiques, mais à un degré moindre. Les principaux procédés testés sont:

1 - Ceux faisant appel à la pyrolyse.

- Réacteur sous pression à 300 °C environ (avec catalyseurs) sous atmosphère d'H_2, N_2, etc.

- Réacteur spécialement adapté, comprenant une première zone, dite de volatilisation, et une deuxième zone, dite de réaction (45 0 °C), dans laquelle les gaz recyclés volatilisés de la première zone subissent les réactions de conversion au contact des goudrons résiduels. Les huiles sont récupérées par condensation des vapeurs. Ce réacteur fonctionne sous fable pression. Il est alimenté avec des boues préséchées thermiquement, en présence d'un catalyseur éventuel.

2 - Ceux faisant appel à la liquéfaction de la matière organique, en présence de solvants, sous des températures plus modérées.

- Réacteur à pression atmosphérique, chauffé à 200-300 °C, dans lequel le gâteau de boue préséché thermiquement est mélangé à des solvants polyaromatiques et à des produits bitumineux. Le ratio MS boue/ solvant est souvent important: 1, voire 1,5 (figure 690).

- Réacteur sous forte pression avec solvants et catalyseurs sur boues liquides ou prédéshydratées.

La difficulté de ces procédés de liquéfaction réside dans la fiabilité de récupération et de recyclage des solvants, et dans la séparation des huiles et goudrons.

Tous ces procédés de conversion ont des rendements en huile relativement modérés: 20 à 60 % de la MO transformée en huile selon le type de boue et le type de réaction. Le développement éventuel futur de ces procédés assez sophistiqués dépend bien évidemment des coûts d'énergie et de la comparaison économique avec les procédés classiques d'incinération.

5.2.3. Formation d'agrégats légers

Les agrégats légers sont généralement des produits naturels (laves volcaniques, genre pouzzolane) ou des produits fabriqués, à partir d'argiles spéciales cuites ou encore de cendres volantes d'usines sidérurgiques. Ces agrégats sont utilisés en construction pour la fabrication de bétons légers.

A partir de boues résiduaires, il est possible de fabriquer de tels agrégats. Le schéma industriel est le suivant

- déshydratation et séchage partiel (siccité 35-40 %),

- ajout de cendres (siccité 55 %),

- fabrication d'agglomérats de 1-3 mm dans un tambour granulateur (pelletisation),

- séchage thermique direct par gaz chauds (siccité 90 %),

- sintérisation des agglomérats séchés, en couche de 40 cm, par combustion à très haute température, sous l'action d'un violent courant d'air qui traverse la couche de haut en bas (température dans la masse: 1200 °C environ). Les agglomérats secs se ramollissent en surface et collent entre eux (morceaux de 10 cm environ), - refroidissement rapide et brutal,

- concassage et stabilisation (érosion) des agrégats,

- criblage.

L'investissement d'une telle installation est important et les contraintes d'exploitation réelles: odeurs, poussières, entretien, complexité. La démonstration économique du procédé n'a pas été faite.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

20
STOCKAGE ET DISTRIBUTION DES REACTIFS

De nombreux produits chimiques sont utilisés en traitement des eaux. Ils peu- - vent être:

- Spécifiques:

coagulants: sels d'aluminium, de fer... oxydants ou désinfectants: chlore... floculants: polyélectrolytes, adjuvants...

adsorbants charbon actif...

- Généraux:

bases: soude, chaux...

acides: sulfurique, chlorhydrique...

Le chapitre 8, sous-chapitre 3, présente les caractéristiques principales d'un grand nombre de réactifs.

1. DISPOSITIONS GÉNÉRALES

1.1. EMBALLAGE - CONDITIONNEMENT

L'emballage et le conditionnement d'un réactif dépendent en particulier

- de son état (solide, liquide, gazeux),
- de sa nature (corrosion, conservation), - de son mode de transport (emballages unitaires perdus ou consignés, vrac),
- de son mode de déchargement et de stockage (citernes, silos et conteneurs pour les quantités moyennes et importantes, sacs, fûts et jerricans sur palettes pour les plus petites).

Les emballages les plus courants sont

. Réactifs liquides

- Fûts ou jerricans en polyéthylène de 20 et 30 litres.
- Conteneurs plastiques parallélépipédiques de 800 litres, manipulables directement par chariots à fourche.

Ces récipients peuvent être vidangés soit par le haut (vide-touries), soit par gravité (piquage en partie basse, muni d'un raccord rapide normalisé diamètre 50 mm - pour branchement d'un flexible), soit enfin par mise sous pression d'air comprimé (1 bar au plus).

. Réactifs solides

- Sacs de 25 ou 50 kg sur palettes.
- Fûts métalliques, plastiques ou en carton (pour le chlorure ferrique anhydre par exemple).
- Conteneurs de grande capacité à palette

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

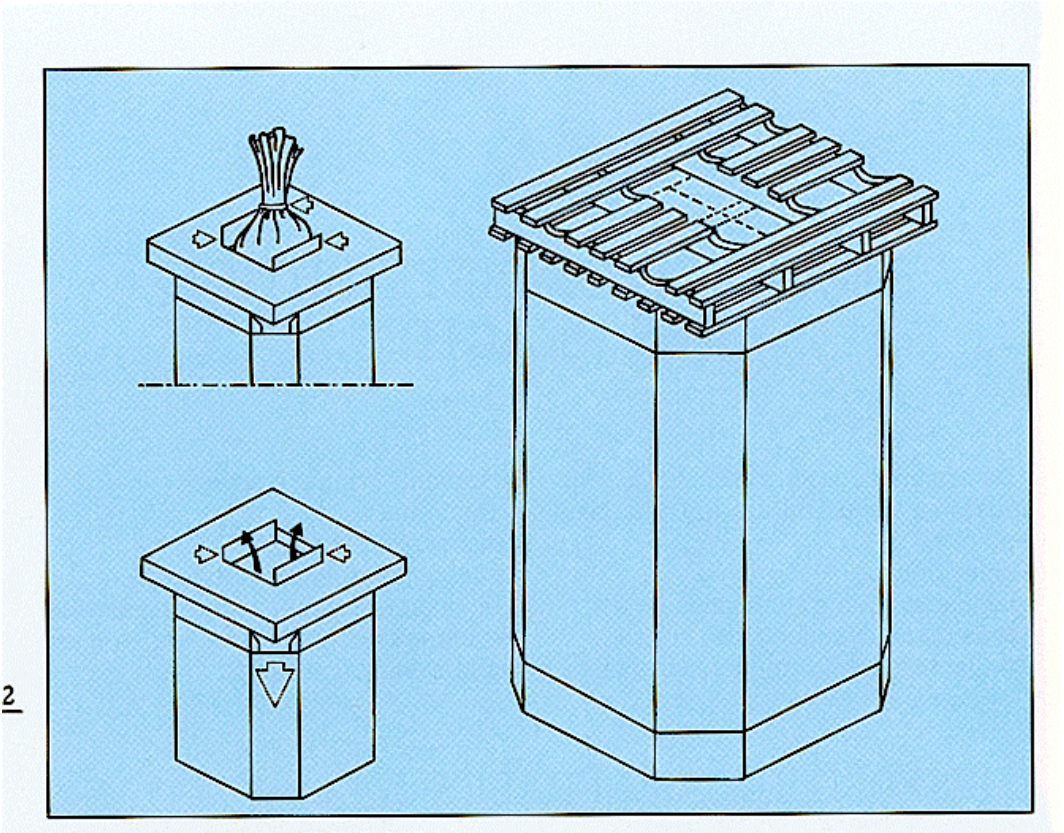
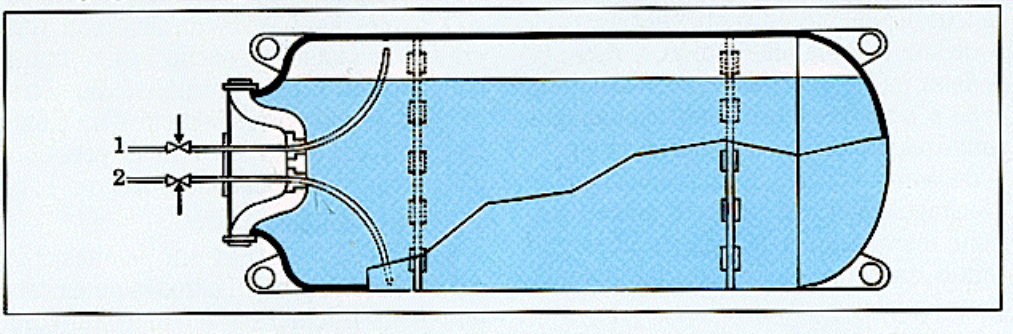


Figure 691 - Conteneur "BIG-BAG".

intégrée ("BIG-BAG"). Voir figure 691.
Dimensions: 90 x 90 x 210 cm.
Capacité: 1 tonne environ.
Enveloppe résistante en polyéthylène tressé.
Vidange gravitaire par le fond.

. **Réactifs gazeux**

Les gaz liquéfiés (chlore, ammoniac, gaz carbonique) sont conditionnés sous pression en bouteilles (verticales) ou tanks (horizontaux) métalliques (figure 692).



1 - Phase gazeuse. 2 - Phase liquide.
Figure 692. Réservoir horizontal (tank).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Liquide et gaz s'y trouvent en équilibre à la pression de vaporisation correspondant à la température du réactif (6 à 9 bars à 20 °C pour chlore et ammoniac, 60 bars pour gaz carbonique).

Si on utilise des bouteilles, il est essentiel de ne prélever que le gaz. Il faut donc n'utiliser les bouteilles qu'en position **verticale.** Les tanks en position **horizontale permettent** un soutirage soit gazeux (les deux robinets étant sur une verticale, et seul le robinet supérieur étant utilisé), soit liquide, pour les débits importants, vers un évaporateur.

1.2 IMPLANTATION

L'implantation générale d'une unité de stockage, préparation, dosage et distribution de réactifs est conçue en gardant à l'esprit les recommandations suivantes:

. Intégrité des réactifs

Les stockages doivent permettre la bonne conservation des produits vis-à-vis du gel, de la chaleur, de la lumière ou des intempéries. Par exemple:

- les solutions de soude concentrées cristallisent à la température ambiante. Les citernes correspondantes doivent être installées dans des locaux chauffés, ou bien être tracées-calorifugées. (La soude à 50 % en poids cristallise dès 10 °C, voir courbe de cristallisation page 497),
- pour stocker et transporter du chlorure ferrique cristallisé ($FeCl_3$, $6H_2O$), il faut éviter les températures dépassant 37 °C, valeur à laquelle le produit fond, avant de prendre en masse au refroidissement,
- les stockages de chlore doivent être abrités du soleil, surtout dans les pays chauds. Vers 70 °C, en effet, la dilatation du liquide supprime l'espace libre à la partie supérieure du récipient, avec risque d'éclatement de ce dernier, puis vaporisation subite de chlore gazeux (mortel).

Les locaux doivent être chauffés en hiver, car un apport extérieur de calories est nécessaire:

pour le maintien du débit gazeux de soutirage,

pour éviter une liquéfaction dans les conduites, préjudiciable aux chloromètres,

- l'eau de Javel se décompose par action de la lumière solaire ou de la chaleur.1053

. **Commodité d'exploitation**

- Chaque fois que possible, les écoulements gravitaires sont préférés, notamment pour les produits pulvérulents.
- Une exception: les stockages de réactifs liquides dangereux (acides - bases) ne doivent pas, sauf dispositions particulières, être installés en hauteur, et surtout au-dessus de zones de circulation de personnel ou occupées par des équipements.
- Il faut de même déconseiller tout passage de tuyauterie de produit corrosif au-dessus d'équipements électriques (moteurs et armoires de commande).

. Nuisances

- Les stockages de chlore sont, si possible, éloignés et, au minimum, séparés des autres parties des installations.
- Les locaux où sont manutentionnés la chaux et le charbon actif en poudre, sont

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

obligatoirement isolés par des cloisons, portes et fenêtres étanches. Ils sont généralement équipés d'un dispositif d'aspiration et de filtration de l'air chargé en poussières.

- Toute préparation automatique de floculants en poudre s'effectue dans des locaux à l'abri de l'humidité (les floculants solides sont fortement hygroscopiques).
- Les armoires électriques de commande sont implantées dans des locaux à l'abri de l'humidité et des poussières de réactifs pulvérulents.

1.3. DIMENSIONNEMENT DES STOCKAGES

Le dimensionnement des aires de magasinage et des capacités de stockage (citernes, silos) découle des possibilités locales d'approvisionnement.

On cherche toujours:

- à éviter les ruptures de stock (autonomie), en tenant compte, suivant les pays, des délais d'acheminement de certains produits,
- à minimiser les coûts de transport, la taille des stockages devant être un multiple simple des capacités unitaires des camions ou wagons.

En France, la plupart des réactifs courants (chaux, acides, soude liquide, chlorure ferrique, sulfate d'alumine, etc.) peuvent être livrés en camion-citernes par quantités unitaires maximales d'environ 24 tonnes.

Le chlore liquide est livré

- en bouteilles (ou "tubes") de 5,15, 30 et 50 kg,
- en tanks (ou "cylindres") de 500 et 1000 kg.

En France, ces récipients sont timbrés à 30 bars par le Service des Mines.

1.4. TRANSPORT - DÉCHARGEMENT - DÉPOTAGE

Le déchargement des réactifs conditionnés sur palettes ne présente pas de difficultés particulières, sous réserve de disposer d'un chariot élévateur à fourche et de transpalettes.

Le dépotage en vrac est plus délicat, mais se justifie économiquement pour les quantités importantes.

- **Les produits pulvérulents** (chaux, charbon actif) sont fluidisés et dépotés pneumatiquement vers des silos fermés, à partir du véhicule dont le réservoir est mis sous pression. L'air de transport est dépoussiéré avant échappement à l'atmosphère. Le dépotage pulsé évite les nuisances dues aux poussières engendrées par les transporteurs mécaniques réservés aux pulvérulents trop hétérogènes (chaux de mauvaise qualité, par exemple). - **Les produits liquides** sont dépotés soit gravitairement, soit par pression d'air, soit par pompage. Les camions-citernes sont généralement équipés de leur propre compresseur ou pompe.

Pour des raisons de sécurité, la tendance est à l'abandon progressif du dépotage sous pression d'air des produits corrosifs, au profit du déchargement par pompage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.5 ACCESSIBILITÉ

La qualité d'un traitement d'eau dépend de la régularité et de la précision du dosage des réactifs.

Le bâtiment qui abrite les installations de stockage, préparation et distribution des produits chimiques, doit donc être d'un abord aisé pour les exploitants. Il doit permettre une bonne accessibilité pour les opérations suivantes

. Contrôle visuel

- des points d'injection des réactifs,
- de la circulation effective des réactifs vitaux.

. Réglages manuels

- des organes de dosage,
- des instruments de contrôle-commande (pH-mètres, débitmètres).

. Mise en solution de réactifs pulvérulents en sacs

- sulfate d'alumine,
- chaux éteinte,
- floculants.

. **Entretien et démontage**

- des clapets et soupapes de pompes
- doseuses,
- des diaphragmes, compteurs, vannes
- sur les tuyauteries,
- des cannes d'injection des réactifs.

. **Nettoyage** des locaux et équipements

- collecte des eaux de lavage et égouttures (sol avec pente et puisard de reprise),
- sol antidérapant dans les zones de préparation de floculants (solutions visqueuses).

L'accessibilité signifie également respect des règles d'ergonomie

- manoeuvres et lectures d'appareils "à hauteur d'homme",
- moyens appropriés pour limiter les efforts de manipulation des fûts ou sacs de produits.

1.6. MATÉRIAUX UTILISÉS

Le tableau 83 donne un aperçu de l'emploi des matériaux courants pour le stockage des réactifs liquides.

On peut noter plus particulièrement les points suivants

- les plastiques (PCV et polyéthylène en particulier) sont couramment utilisés pour le stockage des liquides corrosifs,
- le polyester armé se prête bien à la réalisation des silos de chaux ou d'autres produits pulvérulents, en raison de sa parfaite inaltérabilité, et aussi de ses propriétés de "glisse" qui favorisent l'écoulement du produit,
- l'acier noir est utilisé, en raison de son prix et de ses qualités mécaniques, pour les réservoirs de grande contenance pour:
- la soude à moins de 50 % et en dessous de 50 °C,
- l'acide sulfurique concentré (92 % au moins) en absence de toute trace d'humidité (évent protégé par dessicateur),
- l'acier (même inoxydable) est proscrit au contact de tous les réactifs chlorés usuels (chlorure ferrique, hypochlorites, acide chlorhydrique et chlore gazeux en présence d'humidité).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 83 - Domaine d'emploi de divers matériaux utilisés pour le stockage des réactifs

Matériaux et revêtements Réactifs	Cuve béton sans revêtement	Cuve acier			Cuve Plastique	
		Sans revêtement	Avec revêtement		PCV* PEHD Poly-propylène	Polyester Vinylester
			Époxy,* Hypalon, Polyéthylène	Ebonite		
Acide sulfurique H_2SO_4 < 20 %			X	X	X	X
92 % < H_2SO_4 < 98 %		X				
Acide chlorhydrique			X	X	X	
Soude NaOH < 50 % t < 50 °C		X				
Silicate de sodium	X	X				
Sulfate d'aluminium			X	X	X	X
Chlorure ferrique			X	X	X	X
Permanganate de potassium			X	X	X	X
Hypochlorite de sodium			X	X	X	X
Bicarbonate de sodium					X	X
Chlorite de sodium					X	X
Polyélectrolytes	X				X	X

*Pour PCV et époxy, température inférieure à 30 °C.

1.7. SÉCURITÉ

Certains réactifs utilisés en traitement des eaux sont des produits dangereux (acides, bases, chlore, ammoniac, ozone entre autres).

Les stockages de grande taille d'acides, de soude ou de chlore sont soumis à des réglementations officielles très strictes, auxquelles on doit se reporter dans chaque pays.

Les dispositions concernant les fuites de chlore sont, en particulier, importantes si le stockage nécessite une installation de neutralisation, en cas de fuite de chlore; l'air chloré à neutraliser est aspiré par un ventilateur puis refoulé à la partie inférieure d'une tour où ruisselle à contre-courant une solution neutralisante (lessive de soude seule ou combinée à de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

l'hyposulfite de sodium) à travers des anneaux de contact.

Compte tenu des graves dangers que peut entraîner une fuite de chlore, il est impératif d'équiper les locaux de stockage d'un dispositif efficace de détection de fuites.

Une fuite de chlore gazeux, à partir d'un récipient de stockage, ne peut se maintenir à son débit que s'il se produit un apport extérieur de calories, au travers de la paroi du récipient, correspondant à la chaleur de vaporisation du chlore liquide à ce débit. Par ailleurs, la détente du gaz sous pression, s'écoulant par l'orifice de fuite, s'accompagne d'un abaissement de température tendant à diminuer le débit de fuite. Pour ces raisons, il faut éviter d'arroser ou d'immerger le réservoir de stockage dans l'eau, sauf pour les petites bouteilles de chlore où il n'existe pas d'installation de neutralisation de fuites de chlore et où la seule solution, en cas de blocage du robinet de la bouteille, est l'immersion de cette dernière dans une solution neutralisante.

Indépendamment des réglementations existantes, des précautions élémentaires de bon sens doivent être prises (même si elles ne sont pas légalement obligatoires) lors des manipulations et du stockage de ces produits. On peut citer les recommandations suivantes

- port de cagoule, lunettes, gants et tablier de sécurité, lors de toute intervention sur un circuit véhiculant un produit corrosif,
- installation d'une douche et de lave-ceil spécifiques de sécurité, à proximité des stockages d'acide et de soude,
- construction de fosses de rétention (non reliées aux égouts) sous les citernes d'acide et de soude, avec séparation des fosses en cas de stockages jumelés acide/ soude,
- étiquetage clair des tuyauteries de dépotage, pour minimiser les risques de mélanges dangereux à la livraison de certains réactifs (acide/hypochlorite par exemple),
- entretien systématique des dispositifs de lavage de gaz installés sur les évents des réservoirs d'acide chlorydrique, dont les vapeurs sont irritantes pour les muqueuses des voies respiratoires (et corrosives pour les équipements avoisinants),
- vidanges aux points bas des circuits de réactifs dangereux, pour permettre les interventions d'entretien en toute sécurité,
- en cas de dilution de chlorure ferrique cristallisé ou anhydre de chaux vive, d'acide sulfurique et de soude, faire **attention** à l'ÉCHAUFFEMENT qui peut être violent (voir page 497),
- le charbon actif en poudre, sous forme de poussière en suspension dans l'air, peut s'enflammer spontanément. Travaux et flammes nécessitant des points chauds sont prohibés dans les locaux concernés. Ceux-ci sont généralement munis d'un dispositif de ventilation et de filtration d'air.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. DOSAGE DES RÉACTIFS LIQUIDES

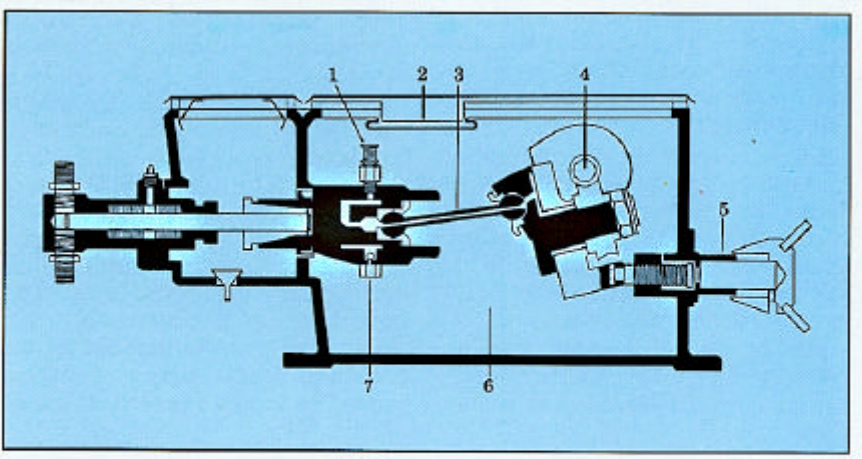
2.1. DOSAGE PAR POMPES DOSEUSES

Les pompes doseuses généralement utilisées dans le traitement d'eau sont des pompes alternatives volumétriques dont le débit est réglable par modification de la cylindrée ou de la vitesse (cadence de marche). Ce réglage peut être manuel ou automatique (servomoteur ou moteur à vitesse variable). Dans ce dernier cas, l'injection de réactifs peut être asservie par exemple au débit d'eau à traiter.

Ces pompes peuvent être à piston plongeur, à membrane actionnée mécanique ment ou hydrauliquement Elles sont caractérisées par leur débit, leur pression de fonctionnement, leur précision; la nature des matériaux du doseur doit être compatible avec le liquide à pomper. Lorsque plusieurs de ces pompes sont liées mécaniquement entre elles en montage multiplex, elles assurent le débit proportionnel de plusieurs liquides.

2.1.1. Pompe doseuse à piston

Elle est très précise mais doit être employée avec précaution pour les liquides abrasifs ou corrosifs. Le débit peut aller de quelques dizaines de millilitres à plusieurs milliers de litres par heure (figure 693).



1 - Soupape de sécurité du circuit de lubrification.
2 - Poche élastique.
3 - Système d'entraînement lubrifié sous pression.
4 - Arbre d'entraînement à vis sans fin.
5 - Réglage micrométrique de course.
6 - Huile de lubrification.
7 - Crépine magnétique.

Figure 693. Pompe doseuse à piston (type MILROYAL).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.1.2. Pompe doseuse à membrane actionnée hydrauliquement

D'une très bonne précision, légèrement inférieure toutefois à celle de la pompe à piston, elle est utilisée pour des liquides corrosifs, toxiques, abrasifs, chargés ou visqueux; elle peut être à simple ou à double membrane, avec détection de rupture (figure 694).

Le débit de ce type de pompe doseuse peut atteindre 2 500 $l.h^{-1}$ par tête doseuse.

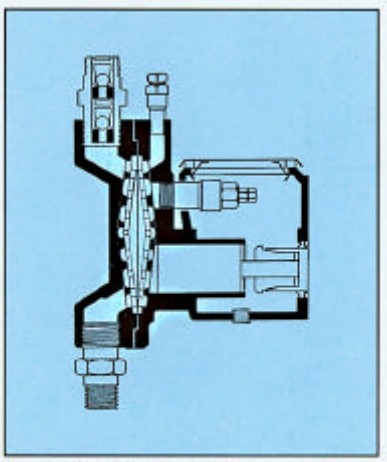


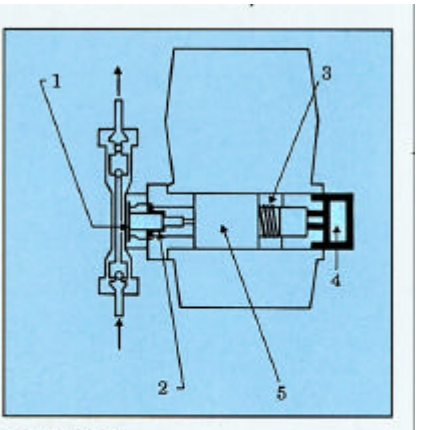
Figure 694. Tête de pompe doseuse à membrane type MILROYAL.

2.1.3. Pompe doseuse à membrane attelée mécaniquement

Plus simple mécaniquement, elle est moins précise que les précédentes et son débit ne dépasse pas 200 $l.h^{-1}$.

2.1.4. Pompe doseuse électromagnétique

Ce type de pompe (figure 695), dont la membrane est commandée par le déplacement de l'électro-aimant, peut être utilisée pour des petits débits inférieurs à 10 $l.h^{-1}$. **Pour** un dosage proportionnel, chaque impulsion émise par le compteur d'eau provoque le déplacement de l'électroaimant et de la membrane (refoulement d'une cylindrée de réactif).



1 - Membrane.
2 - Joint hypalon.
3 - Ressort de rappel.
4 - Réglage de course.
5 - Électro-aimant.

Figure 695. Pompe doseuse électromagnétique.

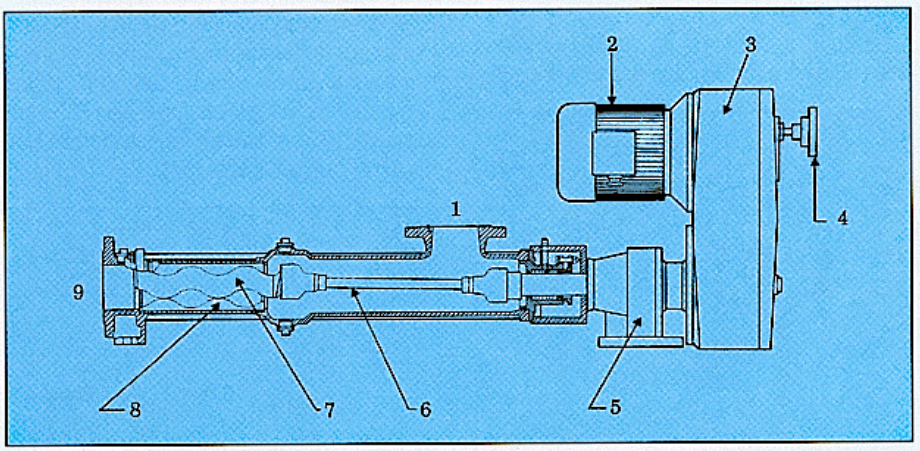
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.1.5. Pompe doseuse à vis excentrée

Sont également utilisées en dosage des pompes doseuses à vis excentrée (figure 696), dont le débit est réglable par modification de la vitesse, manuelle ou automatique (par servomoteur ou moteur à vitesse variable).

2.1.6. Pompe doseuse hydromotrice

Ces pompes ne nécessitent pas d'énergie électrique. Elles sont placées directement (ou en dérivation) sur la tuyauterie de l'eau à traiter qui actionne un piston doseur.



1 - Entrée.
2 - Moteur.
3 - Variateur.
4 - Réglage manuel.
5 - Réducteur avec variateur.
6 - Entraînement à cardan.
7 - Rotor.
8 - Stator en élastomère.
9 - Refoulement.

Figure 696. Pompe doseuse à vis excentrée avec variateur de vitesse manuel.

2.2. DOSAGE GRAVITAIRE

2.2.1. Dosage par doseurs DRC

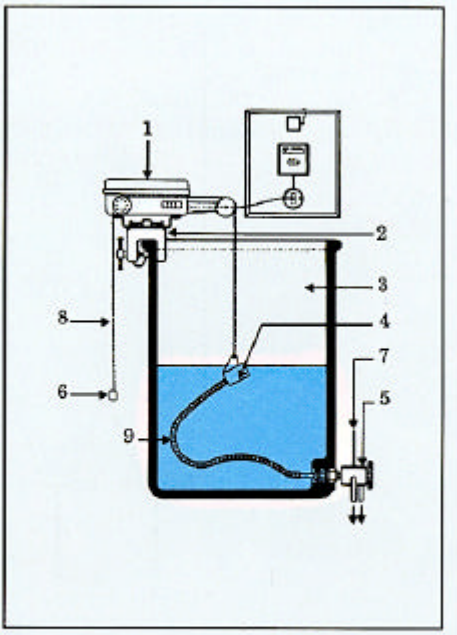
Les doseurs DRC sont adaptés au dosage de petits et moyens débits. Le principe en est simple puisqu'il consiste à faire descendre dans un bac une prise en surface à une vitesse donnée.

La figure 697 donne le schéma d'installation pour le doseur DRC 1. Ce doseur fonctionne à la manière d'une horloge électrique. La base de temps est donnée par un moteur synchrone et un système à échappement commande la descente de la prise en surface; la vitesse de descente peut être réglée en modifiant le nombre de lames de (échappement.

Dans le doseur DRC 4, le moteur électri-

.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Distributeur DRC 1.
2 - Support de distributeur.
3 - Bac de solution.
4 - Godet de prise en surface.
5 - Robinet à 3 voies.
6 - Contrepoids.
7 - Prise d'air.
8 - Chaîne acier inox.
9 - Tuyau souple.

Figure 697. Schéma d'installation du doseur de réactifs type DRC 1.

que est remplacé par un système à ressort à remontage mécanique.

2.2.2. Dosage par doseurs à orifice

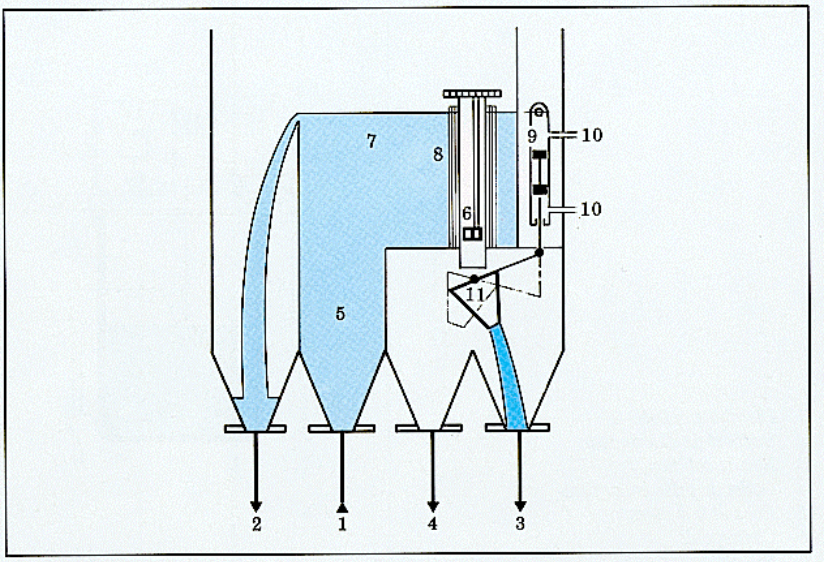
Les doseurs à orifice sont des appareils robustes adaptés au dosage des suspensions. Ils sont conçus pour fonctionner à débit proportionnel au débit à traiter.

Doseur P 106 (figure 698) : une pompe d'un débit supérieur à celui à distribuer refoule par la tubulure (1) la solution ou la suspension dans un compartiment (5) où son niveau est maintenu à une hauteur constante grâce à un déversoir par dessus lequel elle s'écoule pour retourner au bac de préparation par la tubulure (2).

Le réactif traverse la cloison perforée de tranquilisation (7) pour être dosé au travers d'un orifice calibré à section réglable (6) protégé contre le bouchage par une grille (8).

Le réactif tombe ensuite dans un godet oscillant (11) commandé par un vérin pneumatique ou hydraulique (9) qui, en fonction des impulsions données par un régulateur de proportion, le dirige soit vers son point d'injection dans l'installation par la tubulure (3) soit en retour vers le bac de préparation par la tubulure (4).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Arrivée du liquide à doser.
2 - Retour du trop plein vers le bac de préparation.
3 - Départ du liquide dosé vers l'utilisation.
4 - Retour du liquide vers le bac de préparation.
5 - Compartiment d'arrivée du liquide à doser.
6 - Doseur à orifice réglable.
7 - Grille de tranquillisation.
8 - Grille de protection de l'orifice.
9 - Vérin hydropneumatique.
10 - Arrivée de fluide moteur.
11 - Godet oscillant.

Figure 698. Schéma simplifié du doseur type P 106.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. STOCKAGE ET DOSAGE DES PRODUITS PULVÉRULENTS

3.1. STOCKAGE

Petites installations: aire de stockage (sacs ou conteneurs).

Moyennes et grandes installations

silos.

La capacité du silo est variable (15 à 200 m^3, voire 400 m^3) selon l'importance de l'installation et l'autonomie recherchée. L'approvisionnement des produits se fait en vrac par camion ou wagon. Les silos sont métalliques, en polyester armé de fibre de verre ou en béton. Ils sont de forme cylindro-conique.

3.1.1. Règles d'installation

Le silo doit être équipé d'un évent muni d'un dépoussiéreur à manches et d'une soupape de sécurité contre les surpressions. La conduite de remplissage, de diamètre 80 ou 100 mm, doit présenter des coudes de rayon de courbure suffisant pour limiter l'usure et la perte de charge. Il y a lieu de limiter, dans la mesure du possible, la longueur de la conduite. Le silo doit être mis à la terre pour éviter la formation de voûte due à l'électricité statique. La capacité de stockage doit être largement supérieure (au moins 50 %) au volume de livraison.

Pour faciliter la vidange:

- la pente du cône au bas du silo doit être d'au moins 60°,
- des dispositifs destinés à faciliter l'écoulement sont à prévoir.

3.1.2. Remplissage du silo

Il se fait pneumatiquement par le haut du silo. Le produit est soufflé (par de l'air fourni par un compresseur installé sur le camion ou en poste fixe) dans une canalisation souple reliée à la conduite montante du silo par un raccord pompier. La pression de dépotage doit être limitée à 160 kPa.

Plusieurs types de contrôle du niveau sont possibles

- mesure capacitive (à éviter sur produits colmatants),
- lame vibrante,
- palpeur à va-et-vient entraîné mécaniquement

Nota: il est également possible de contrôler le poids de produit par pesée du silo.

Figure 699. Silo avec dévoûteur SODIMATE.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.1.3. Dispositifs destinés à faciliter l'écoulement des produits

Les produits pulvérulents ont tendance à former des voûtes ou des cheminées dans le silo. Pour éviter ces anomalies, plusieurs solutions peuvent être adoptées.

. Vibreurs

A utiliser avec discernement car ils peuvent provoquer le tassement du produit.

. Fluidisation

Injection d'air à basse pression (20 à 60 kPa) dans des plaques de fluidisation installées dans la partie conique du silo. Ce dispositif ne donne de bons résultats que s'il est utilisé par intermittence et avec de l'air parfaitement sec.

. Dévoûteur mécanique à lames souples

Sa rotation assure l'écoulement du produit (figure 702).

3.2. DOSAGE

3.2.1. Doseurs volumétriques

Vanne alvéolaire

Ce type de dosage (figure 700) est utilisé dans les installations où une très grande précision n'est pas nécessaire. La vanne peut être asservie à un chronocontact ou à un moteur à vitesse variable. Les débits ainsi dosés peuvent aller de 50 à 1000 $l.h^{-1}$.

Cet organe, du fait de son étanchéité, peut également assurer l'alimentation régulière d'un système de transport pneumatique.

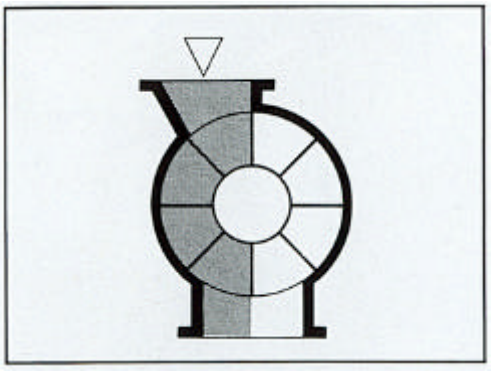


Figure 700. Vanne alvéolaire.

. Doseur à sole tournante

A la base de la trémie d'alimentation est disposée une sole tournante (figure 701), à vitesse constante, sur laquelle un couteau, dont l'angle d'attaque est réglable, découpe une couronne plus ou moins importante de produit.

Ce type de doseur est d'une précision supérieure à celle de la vanne alvéolaire. Il est adapté à la distribution (débit de

Figure 701. Doseur à sole tournante, équipé d'un vortex, vu couvercle ouvert.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

10 à 1000 lh^{-1}) de réactifs tels que le sulfate d'aluminium, la chaux, le carbonate de calcium ou de sodium, etc.

La modification du débit se fait par variation de l'angle d'attaque du couteau, le moteur étant à vitesse constante et fonctionnant en continu ou par syncopage. Un moteur à vitesse variable peut également être utilisé.

. Doseurs à vis

Ce type de doseur permet le dosage, avec une précision suffisante, de la plupart des produits pulvérulents y compris les produits à caractère fusant. Il est alimenté à partir d'un silo muni d'un dévoûteur (figure 702). Ce dévoûteur assure l'alimentation régulière de la vis en produit de densité apparente constante. La vis ainsi saturée entraîne une quantité donnée du produit par rotation de la spire dans la gaine. La spire et la gaine sont flexibles ou rigides.

Bien que l'installation optimale soit à l'horizontale, un doseur à vis permet, si nécessaire, de remonter le produit sur une faible hauteur.

3.2.2. Dosage gravimétrique

Le dosage gravimétrique n'est pas influencé par les variations de densité apparente du produit distribué. Celui-ci est pesé en continu. Tout écart, entre le **débit** massique mesuré et le débit massique de consigne, conduit à une action sur le dispositif de distribution tendant à annuler cet écart.

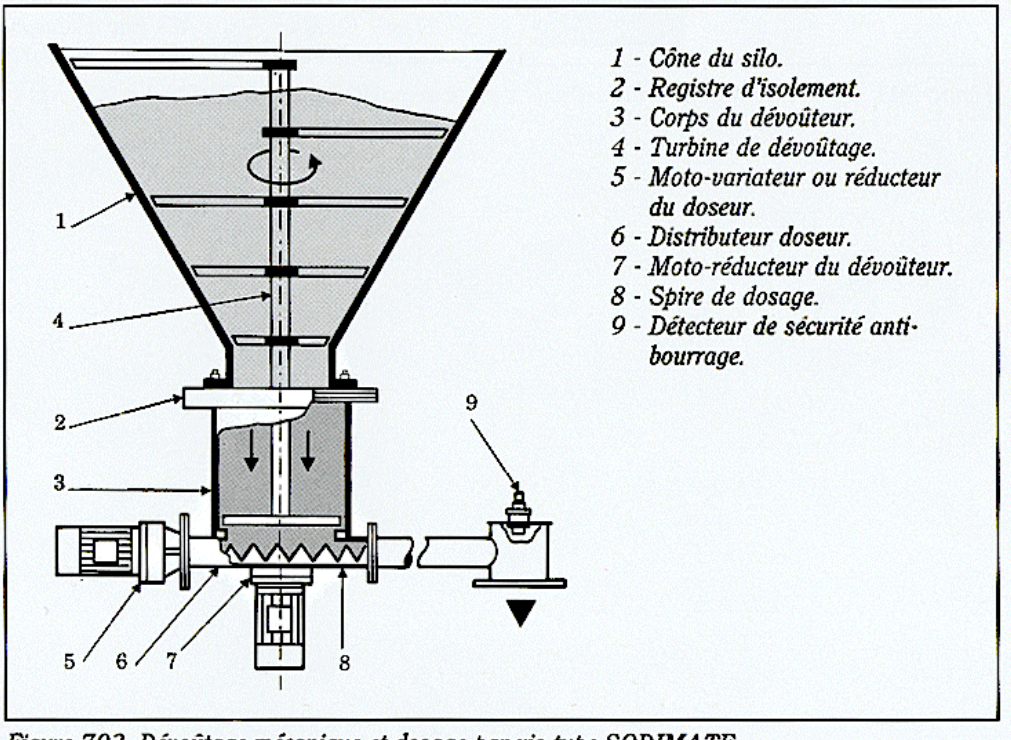


Figure 702. Dévoûtage mécanique et dosage par vis type SODIMATE.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

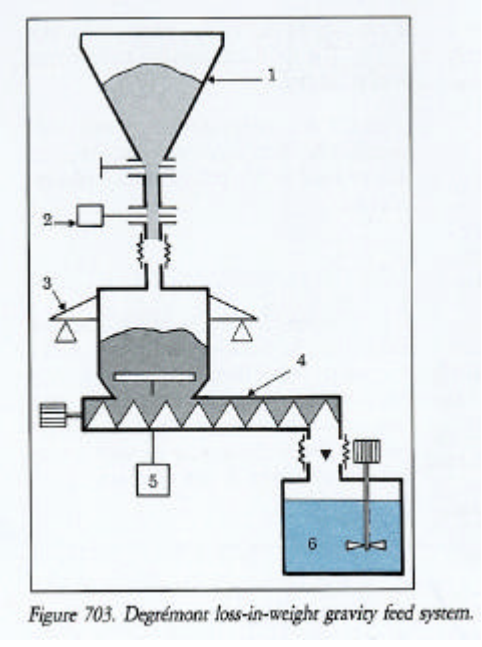


Figure 703. Degrémont loss-in-weight gravity feed system.

Exemple: la figure 703 représente un dispositif de dosage, gravimétrique à perte de poids DEGREMONT.

La trémie doseuse contenant le produit à doser est pesée en permanence par un capteur à jauges de contrainte qui mesure le débit massique réel dosé; un système de régulation fait varier la vitesse du doseur à vis pour annuler l'écart par rapport au débit massique de consigne. L'alimentation de la trémie peseuse est effectuée, à partir de la trémie de remplissage, par ouverture rapide de la vanne à pelle à grand débit jusqu'au seuil haut. En période de remplissage, la régulation est bloquée sur la dernière vitesse de la vis.

1 - Trémie de remplissage.
2 - Vanne à pelle.
3 - Trémie peseuse suspendue.
4 - Doseur à vis.
5 - Racleur.
6 - Bac délayeur.

Figure 703. Schéma de dosage gravimétrique à perte de poids DEGRÉMONT.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. PRÉPARATION DES SUSPENSIONS ET DES SOLUTIONS DE RÉACTIFS EN POUDRE OU EN GRAINS

4.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX

Les réactifs solides utilisés en traitement d'eau sont généralement mis en solution ou en suspension dans l'eau, ce qui favorise
- le transfert vers le point d'utilisation, - le mélange avec le fluide à traiter,
- et souvent la régularité et la précision de dosage.

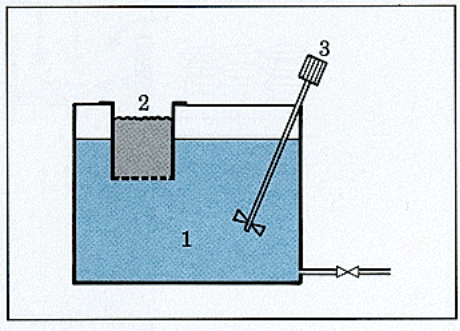
La préparation des solutions et suspensions des réactifs courants (chlorure de sodium, sulfate d'aluminium, chlorure ferrique, chaux éteinte) ne présente pas de difficultés particulières quand les réactifs ont une granulométrie régulière et un taux d'impuretés contrôlé. Dans les cas contraires, des dispositions spéciales sont prises pour
- éliminer les impuretés,
- permettre l'utilisation de réactifs en blocs ou pris en masse.

De manière générale, les dispositifs de dissolution et de mise en suspension doivent être adaptés à la qualité réelle des réactifs solides disponibles localement (granulométrie et impuretés).

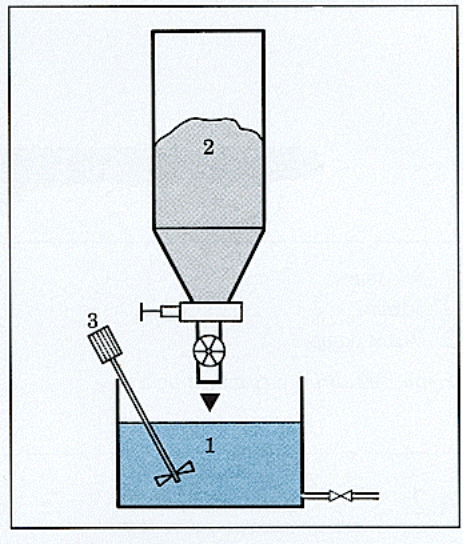
Par ailleurs, le maintien en suspension de certains réactifs colmatants et/ou entartrants tels que chaux ou charbon actif, impose le respect de précautions particulières.

L'énergie nécessaire à la mise en solution ou en suspension des réactifs solides est le plus souvent apportée

. par agitation mécanique (figures 704)



a) with immersed solids.



b) with dry stored solids.
1. Solution. 2. Reagent. 3. Stirrer.

Figure 704. Preparing solutions and suspensions.

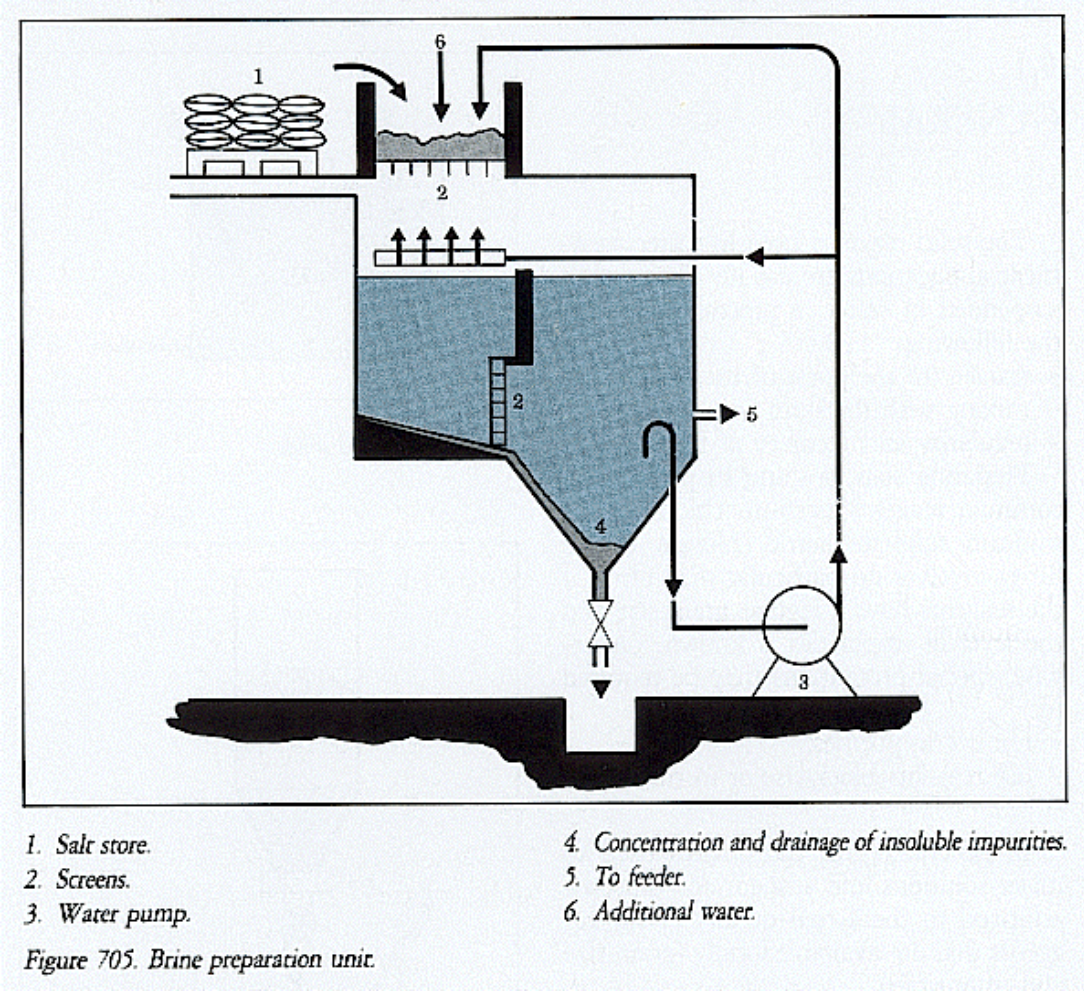
b) - à partir de produits solides stockés à sec.
1 - Solution. 2 - Réactif. 3 - Agitateur.
figure 704. Préparation de solutions ou suspensions.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

. **Par recirculation forcée** de l'eau de dissolution (figure 705).

Cette énergie doit être maintenue en permanence dans le cas de suspensions; dans le cas de solutions, elle n'est normalement appliquée que pendant la dissolution.

La préparation d'un bac de réactif ne doit pas perturber le traitement (bacs en alternance ou séparés pour préparation et dosage).



1. *Salt store.*
2. *Screens.*
3. *Water pump.*
4. *Concentration and drainage of insoluble impurities.*
5. *To feeder.*
6. *Additional water.*

Figure 705. Brine preparation unit.

1 - Stockage de sel.
2 - Grilles.
3 - Circulation d'eau de dissolution.
4 - Concentration et purge des impuretés insolubles.
5 - Vers doseur.
6 - Eau d'appoint.
Figure 705. Poste de préparation de saumure.

4.2. PRÉPARATION DES SOLUTIONS

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La concentration maximale des solutions correspond à la limite de solubilité du réactif (saturation) à température donnée (voir page 480). Pour la plupart des réactifs solubles, il y a relation directe entre la concentration des solutions et la densité, ce qui permet un contrôle simple.

4.2.1. Chlorure de sodium

Il est employé comme régénérant des échangeurs d'ions (adoucissement, dénitratation d'eau potable). La figure 705 montre un exemple de poste de préparation de saumure pour une installation importante.

Le dosage s'effectue à partir d'un bac séparé contenant la saumure à concentration fixe, généralement proche de la saturation. Le contrôle est fait par densimètre (voir chapitre 8, § 3.2.1).

. Matériaux

Les fosses en béton reçoivent un revêtement protecteur. L'acier (noir ou inox) est proscrit pour toutes les parties en contact avec la saumure. Les matières plastiques et l'acier ébonité sont couramment employés.

4.2.2. Sulfate d'aluminium

Il est employé comme coagulant sous forme solide ou liquide, cette dernière étant la plus fréquente. Le produit cristallisé $AL_2(SO_4)_3$, $18H_2O$ se présente:

- en poudre < 0,5 mm,
- en semoule 1 à 3 mm,
- en noisettes 5 à 30 mm, - en blocs (parfois).

. Dissolution

La dissolution est généralement effectuée à des concentrations de l'ordre de 100 à 200 g.l-1 de produit cristallisé, contrôlées par densimètre (voir page 487).

- Petites unités

Mise en solution à partir de sacs de 25 ou 40 kg dans un bac délayeur fonctionnant entre deux niveaux (préparation par cuvées). (figure 706).

- Grosses installations

Mise en solution à partir de silos de stockage dans un bac délayeur fonctionnant à niveau constant (en continu). (figure 707).

Dans ce cas, le dosage à sec est assuré par doseurs volumétriques (sole tournante, vis ou doseur alvéolaire) ou, si une précision plus grande est demandée, par doseurs gravimétriques. Les dispositifs décrits par les figures 706 et 707 s'appliquent également à la chaux éteinte.

Dans le cas d'utilisation de produits contenant beaucoup d'impuretés, on s'oriente plutôt vers le dispositif de dissolution représenté à la figure 708 pour le chlorure ferrique.

. Matériaux et sécurité

Les solutions aqueuses de sulfate d'aluminium sont acides, et les matériaux utilisés pour le stockage ou la distribution doivent en tenir compte (matières plastiques et acier inox).

Le produit solide dégage des poussières irritantes pour le nez et la gorge.

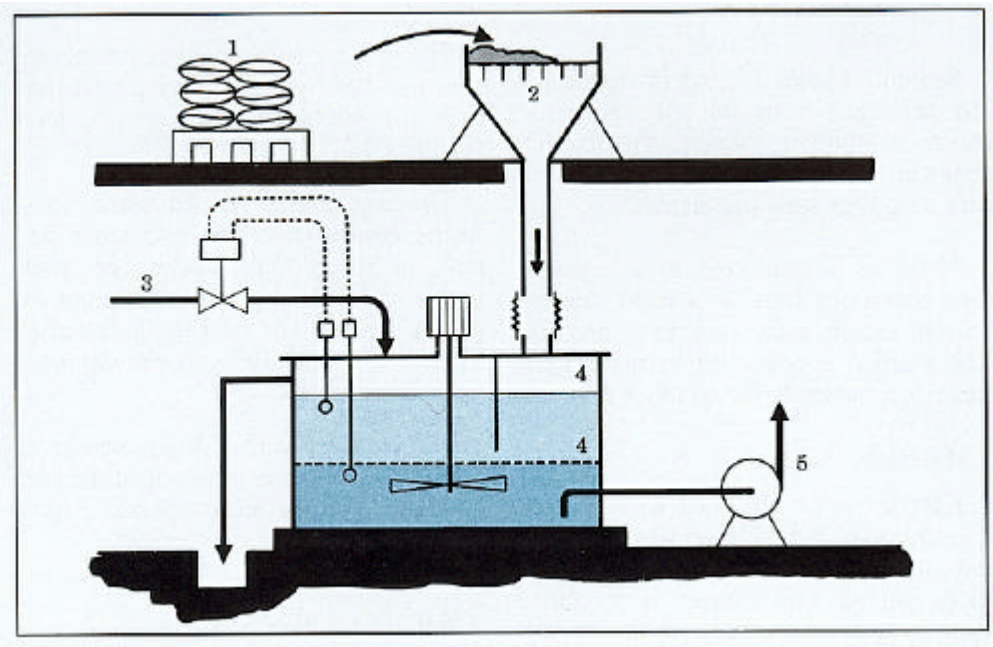
4.2.3. Chlorure ferrique

Il est employé comme coagulant sous forme solide ou liquide, cette dernière étant la plus utilisée. Le produit cristallisé ($FeCl_3$, $6H_2O$) est sous forme de morceaux bruns ou rouges, qui ont tendance à s'agglomérer par fusion dans leur eau de cristallisation.

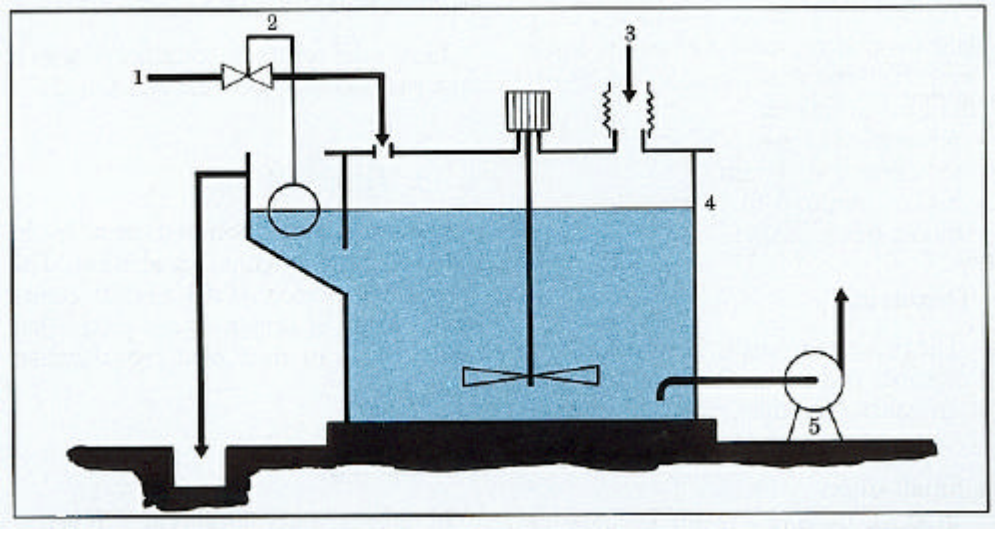
. **Dissolution**

La mise en solution nécessite de pouvoir purger le bac délayeur des impuretés insolubles qui sont très fréquemment présentes dans le produit commercial.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

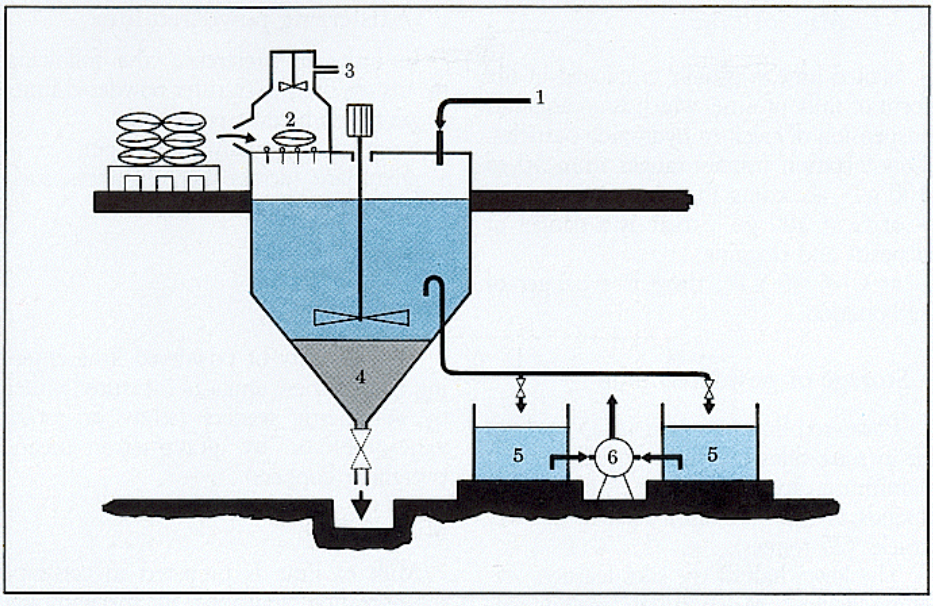


1 - Sac de réactif 2 - Trémie de dessachage. 3 - Eau. 4 - Niveaux maximum et minimum. 5 - Pompe distributrice.
Figure 706. Bac de dissolution (par bâchées) pour sulfate d'aluminium ou lait de chaux.



1 - Eau. 2 - Vanne à flotteur. 3 - Réactif dosé à sec. 4 - Niveau constant. 5 - Pompe distributrice.
Figure 707. Bac mélangeur (en continu) pour sulfate d'aluminium ou lait de chaux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1. Solution water.
2. Unloading unit.
3. Dust extractor.
4. Impurity settling zone.
5. Feed tanks.
6. Feed pump.

Figure 708. Unit for dissolving and feeding powdered crystallized ferric chloride.

1 - Eau de dissolution.
2 - Dessacheuse.
3 - Aspiration des poussières.
4 - Zone de décantation des impuretés.
5 - Bacs de dosage.
6 - Pompe de distribution.

Figure 708. Poste de dissolution et de dosage de chlorure ferrique cristallisé en poudre.

Le dosage s'effectue à partir d'une solution préparée à concentration constante (par exemple 100 à 200 $g.l^{-1}$ en $FeCl_3$), contrôlée par densimètre (page 487).

La figure 708 représente un poste de dissolution conçu pour du chlorure ferrique en poudre ou en morceaux friables.

Le chlorure ferrique en blocs peut être mis en solution au moyen d'un dispositif tel que celui représenté à la figure 705 pour la saumure.

. **Matériaux et sécurité**

Les solutions aqueuses de chlorure ferrique attaquent l'acier noir ou inox et presque tous les métaux. Les cuves et circuits sont à protéger en conséquence (matières plastiques et acier ébonité).

Le produit solide dégage des poussières irritantes pour le nez et la gorge.

4.3 CHAUX

La chaux est le réactif le plus fréquemment rencontré en traitement d'eau. Elle est livrable sous deux formes :

- chaux vive: CaO (page 1089),
- chaux éteinte (ou hydratée): $Ca(OH)_2$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.3.1. Lait de chaux

La chaux éteinte est généralement utilisée sous forme de lait de chaux, qui est une suspension aqueuse de particules d'hydroxyde de calcium. La concentration en est normalement comprise entre 50 et 100 g. l-1 par commodité d'utilisation; en effet

- pour C > 100 g.l^{-1}: risques de dépôts et bouchages,
- pour C < 50 g. l^{-1}: risques de carbonatation.

. Stockage de chaux pulvérulente

En sacs de 25 kg ou en silo, selon la taille de l'installation. En France, les silos ont de préférence une capacité minimale de 50 m3, correspondant à la charge utile maximale des camions (25 tonnes).

Les silos comportent à la partie inférieure un dispositif de dévoûtage. Les dévoûteurs **mécaniques** sont généralement préférés aux insufflations d'air de fluidisation.

. Transfert de chaux pulvérulente

Les modes de transfert sont dans l'ordre préférentiel

- gravitaires (chaque fois que possible), - mécaniques (généralement par vis),
- pneumatiques (sur courtes distances, par exemple pour le dépotage des camions-citernes).

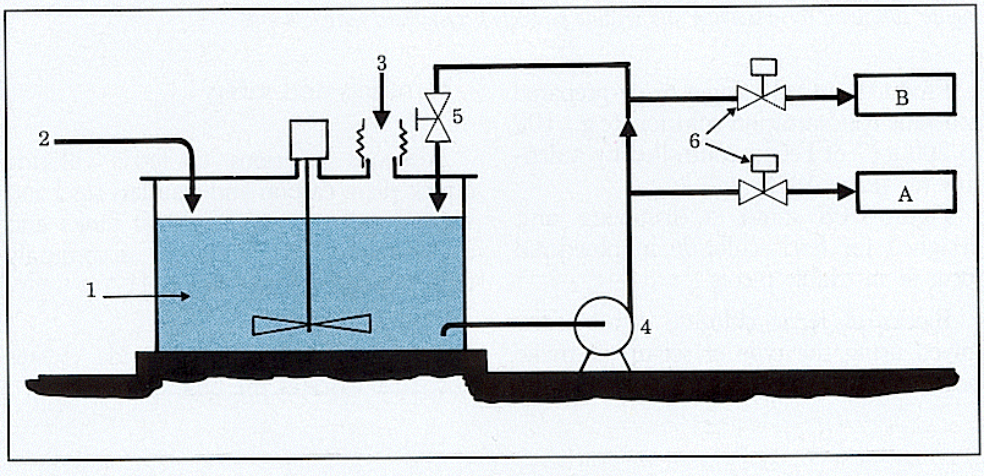
. Dosage

Chaux en poudre

La quantité de chaux pulvérulente arrivant sur les bacs délayeurs est mesurée soit par des doseurs volumétriques (vis ou vannes alvéolaires), soit par des doseurs gravimétriques (trémies peseuses).

Lait de chaux

Le lait de chaux est préparé à concentration sensiblement constante dans des bacs délayeurs à agitation mécanique tels que ceux illustrés sur les figures 706 ou 707.



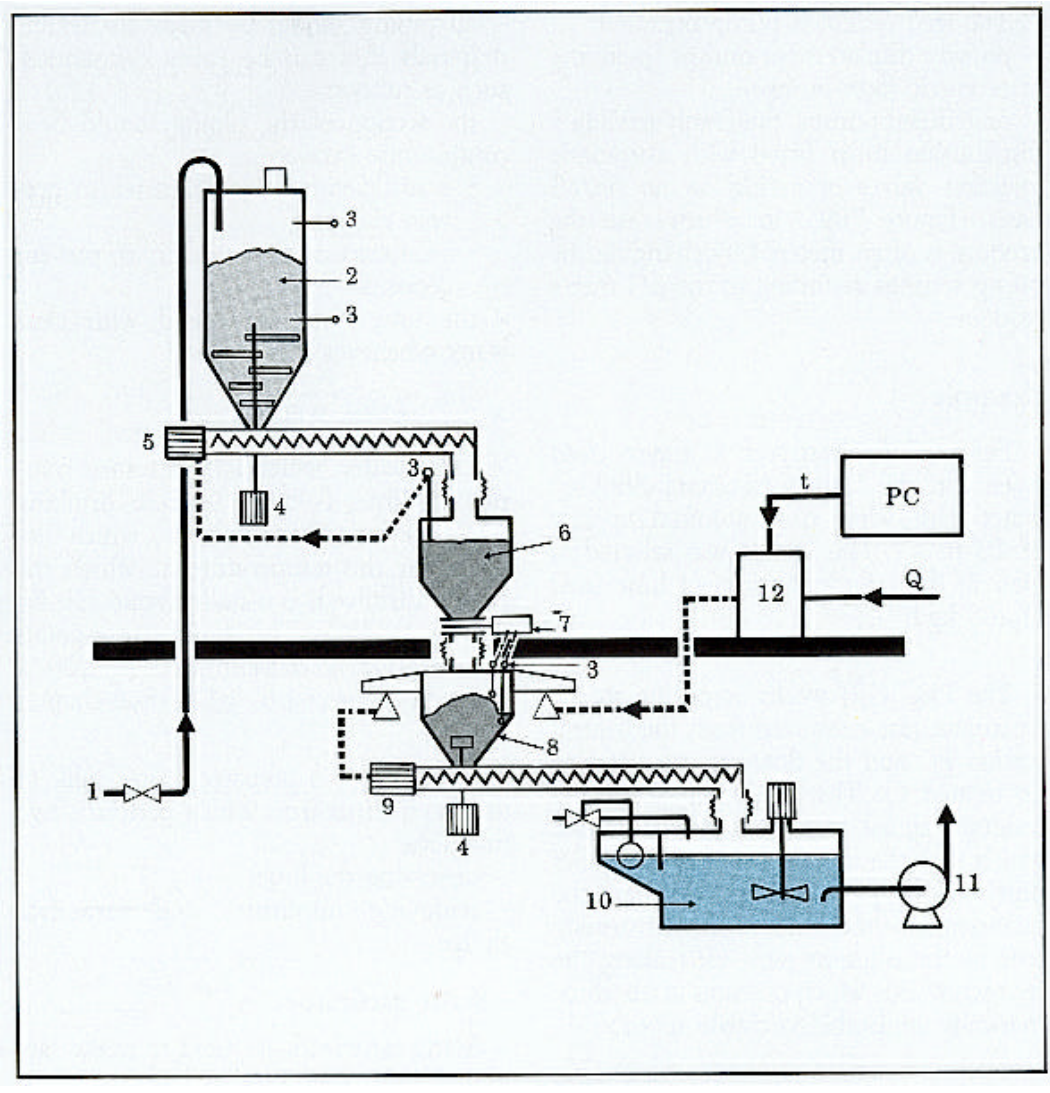
1. Dilution tank.
2. Water.
3. Lime.
4. Centrifugal pump.
5. Manual control valve.
6. Automatic feed valves.
A-B. Points of use.

Figure 709. Milk of lime distribution and feeding system.

1 - Bac délayeur.
2 - Eau.
3 - Chaux.
4 - Pompe centrifuge.
5 - Vanne manuelle de réglage.
6 - Vannes automatiques de dosage. A-B - Utilisateurs.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 709. Boucle de distribution et de dosage de lait de chaux.



1 - Dépotage pneumatique. .
2 - Silos.
3 - Sondes de niveau.
4 - Dévoûteurs mécaniques.
5 - Vis de transfert (vitesse fixe, marche intermittente).
6 - Trémie intermédiaire.
7 - Vanne automatique.
8 - Trémie peseuse.
9 - Vis de transfert (vitesse variable, marche continue).
10 - Bacs délayeurs à niveau constant
11 - Pompe de distribution (vers 4 saturateurs).
12 - Automate. PC - Poste de commande.
t - Taux de traitement
Q - Débit d'eau à traiter.
.

Figure 710. Installation de LISBONNE-ASSECEIRA (Portugal). Dosage gravimétrique de chaux éteinte

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La distribution est réalisée par pompes:

- volumétriques (doseuses ou à rotor excentré),
- centrifuges, alimentant de préférence une boucle de distribution munie de vannes automatiques d'injection, fonctionnant en "tout ou rien". Dans ce cas, le dosage est souvent assuré par la cadence d'ouverture de ces vannes, par exemple à partir des indications d'un pH-mètre (figure 709).

Exemple de réalisation

La figure 710 schématise une installation de dosage gravimétrique (station d'EP de LISBONNE-ASSEICEIRA, débit nominal: 4,3 $m^3.s^{-1}$).. Ce mode de dosage a été retenu, notamment en raison de l'importance des quantités de chaux utilisées (1200 kg. h^{-1}).

L'automate (12) intègre le taux de traitement t reçu du poste de commande PC et le débit Q d'eau à traiter. Il envoie la consigne résultante à la trémie peseuse. Celle-ci fixe en permanence (par détermination de la perte de poids de chaux par unité de temps) la quantité de chaux à envoyer en continu au bac délayeur (10) par l'intermédiaire de la vis de transfert (9) dont la vitesse variable s'ajuste automatiquement.

La trémie intermédiaire (6), située au-dessus de la trémie peseuse, a pour objet de minimiser le temps de remplissage de cette dernière.

Précautions particulières d'exploitation (colmatage)

En raison de son caractère fortement entartrant et colmatant, le lait de chaux nécessite le respect de précautions particulières pour la réalisation et l'exploitation des postes de préparation et de distribution. Par exemple :

- utilisation de canalisations en matière souple (caoutchouc) ou facilement démontables,
- diamètres de tuyauteries assurant un compromis entre
  - une section de passage suffisante (bouchage),
  - une vitesse de circulation correcte (dépôts),
- rinçage à l'eau claire après chaque arrêt.

- utilisation d
eau souple (

4.3.2. Eau de chaux

L'eau de chaux (solution saturée de chaux) est fréquemment utilisée dans les stations d'eau potable. Son titre, qui dépend de la température de dissolution, est d'environ 220 °F de TAC à 20 °C. Ceci correspond à une concentration en $Ca(OH)_2$ de 220 x 7,4 $mg.l^{-1}$, soit 1,6 $g.l^{-1}$ (page 487).

L'eau de chaux est préparée à partir de lait de chaux dans un appareil appelé saturateur, qui assure à la fois

- la mise en solution de la chaux,
- l'élimination des impuretés et des boues de carbonates.

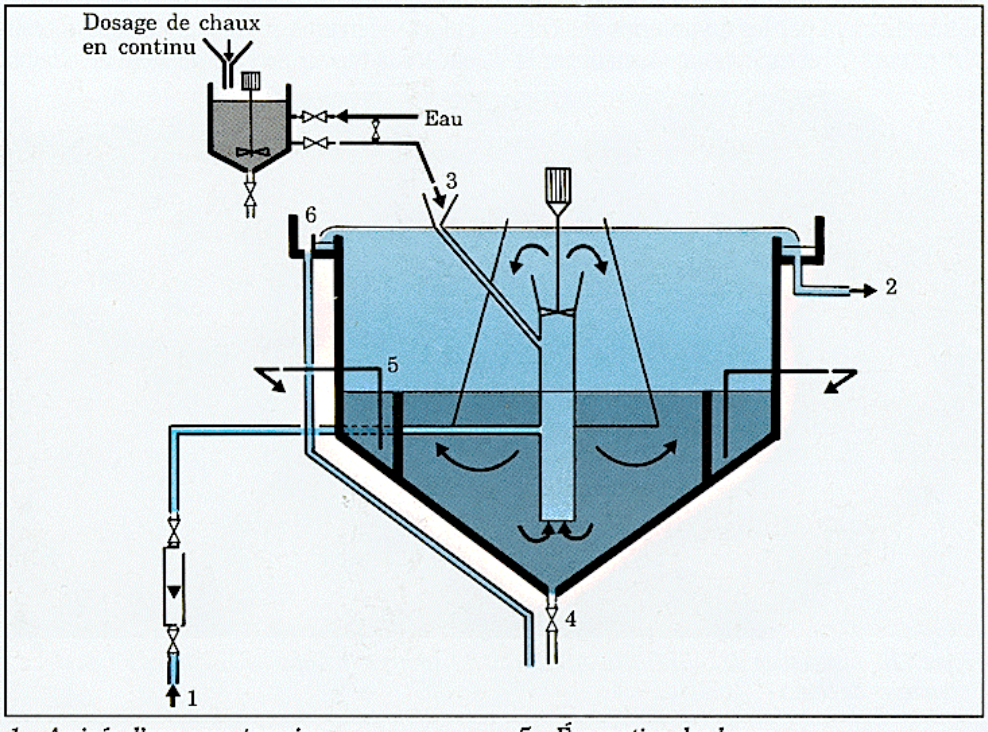
. **Saturateur statique**

Cet appareil permet d'obtenir une solution saturée de chaux, en faisant passer de l'eau à travers un lit de chaux, pendant un temps de contact suffisant pour permettre la saturation de cette eau.

Le lait de chaux est préparé en discontinu. Il est injecté par gravité ou par pompage à la partie inférieure du saturateur après qu'on ait, au préalable, baissé le niveau dans ce dernier et évacué les boues de carbonate et les impuretés par la vidange. Cette recharge en lait de chaux s'effectue en général toutes les 24 heures.

4. Préparation des suspensions et des solutions de réactifs en poudre ou en grains

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Arrivée d'eau sous pression.
2 - Sortie d'eau saturée.
3 - Arrivée lait de chaux.
4 - Vidange.
5 - Évacuation des boues.
6 - Trop-plein.
7 - Hélico-mélangeur.

Figure 711. Saturateur de chaux avec turbine. Schéma de principe. Préparation gravitaire.

L'eau à saturer arrive à la partie inférieure de l'appareil; l'eau saturée est reprise en surface.

Le saturateur peut débiter, sous forme d'eau de chaux saturée, 1,3 à 1,6 kg de $Ca(OH)_2$, par heure et par mètre carré de surface.

. **Saturateur à turbine**

Cet appareil (figure 711) permet d'obtenir, pour une même surface, un débit d'eau de chaux plus élevé que celui du saturateur statique, soit 3,2 à 4 kg de $Ca(OH)_2$, par heure et par mètre carré de surface.

Le lait de chaux est préparé en continu ou en discontinu, mais distribué obligatoirement en continu. Il est injecté par gravité ou par pompage dans la tuyère de recyclage des boues ou dans la tuyauterie d'arrivée d'eau de dissolution.

Le recyclage est effectué par hélico-mélangeur (7) placé à la partie haute de la tuyère dans laquelle arrive également l'eau à saturer (1) et où s'effectue le mélange intime eau + lait de chaux + boues de carbonates. L'appareil fonctionne avec un lit de boues dont le niveau est réglé par le seuil des concentrateurs où se déversent ces boues.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'extraction de ces dernières s'effectue habituellement par les tuyauteries des concentrateurs (5) et exceptionnellement par la vidange (4) (boues lourdes). L'addition de chlorure ferrique en très faible dose accroît encore la teneur en CaO de l'eau de chaux.

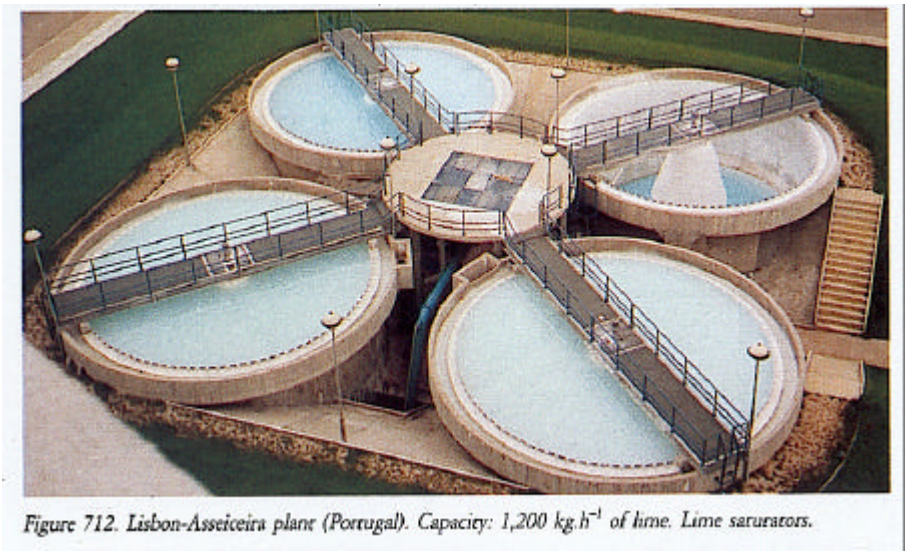
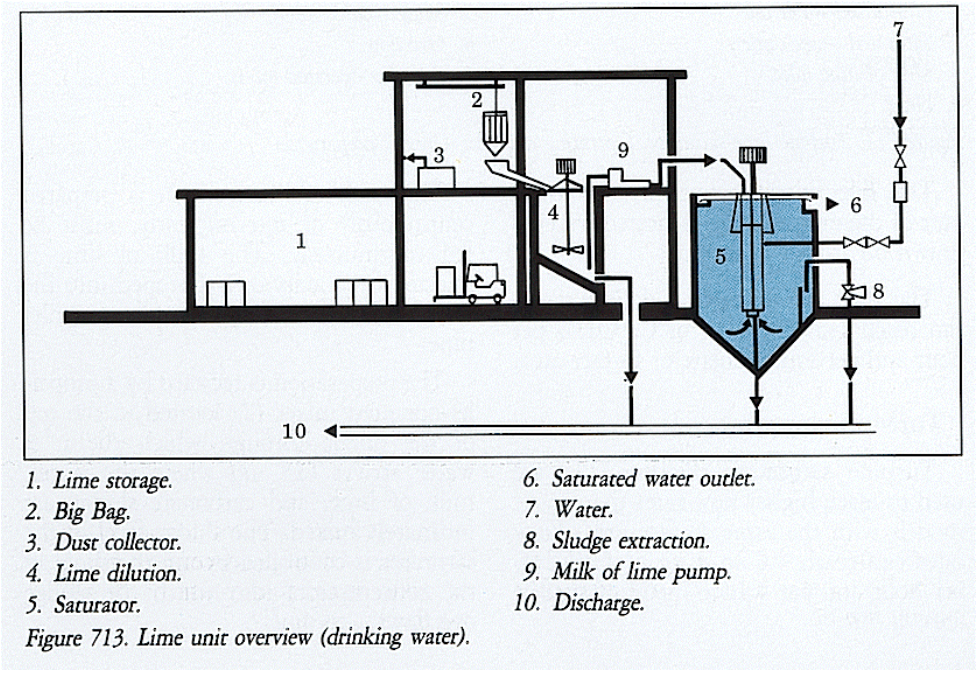


Figure 712. Lisbon-Asseiceira plant (Portugal). Capaciey: 1,200 kg.h^{-1} of lime. Lime saturators.

Figure 712. Installation de LISBONNE-ASSEICEIRA (Portugal). Capacité: 1200 kg.h^{-1} de chaux. Saturateurs de chaux.



1. *Lime storage.*
2. *Big Bag.*
3. *Dust collector.*
4. *Lime dilution.*
5. *Saturator.*
6. *Saturated water outlet.*
7. *Water.*
8. *Sludge extraction.*
9. *Milk of lime pump.*
10. *Discharge.*

Figure 713. Lime unit overview (drinking water).

1 - Stockage de chaux.
2 - BIG BAG.
3 - Dépoussiéreur.
4 - Délayeur de chaux.
5 - Saturateur.
6 - Sortie d'eau saturée.
7 -Eau.
8 - Extraction des boues.
9 - Pompe à lait de chaux.
10 -Egout.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 713. Ensemble de poste complet de chaux (eau potable).

Les saturateurs de chaux peuvent également travailler en dissolveurs de chaux en deçà de la saturation.

La figure 713 montre la disposition générale d'un poste complet de préparation de lait et eau de chaux (bac délayeur et saturateur) fréquemment rencontrée sur les installations d'eau potable de taille petite ou moyenne (chaux en sacs et dessacheuse).

4.4. PRODUITS DIVERS

4.4.1. Permanganate de potassium

Il est employé principalement pour l'oxydation et l'élimination du manganèse.

Le produit (paillettes violettes) est dissous par agitation dans un bac. Il est peu soluble (5 à 30 $g.l^{-1}$ à 20 °C pour un temps de contact de 15 à 60 minutes). Il y a risque de dépôts si la concentration est supérieure à 15 $g.l^{-1}$ et la durée de conservation des solutions est limitée. Le dosage se fait par pompe doseuse.

Le produit attaque les métaux ferreux. On utilise l'acier protégé ou les matières plastiques. Il est à manipuler avec précaution (gants, lunettes).

4.4.2. Carbonate de calcium

La poudre de carbonate est employée en minéralisation et comme charge minérale.

Le produit est pratiquement insoluble (15 $mg.l^{-1}$ à 20 °C). Il est mis en suspension et dosé à une concentration d'environ 50 gl^{-1}, au moyen des mêmes dispositifs que ceux employés pour le lait de chaux.

4.4.3. Bentonite (argile)

Elle est employée pour l'alourdissement du floc obtenu à partir d'une eau brute peu chargée en MES.

Sa mise en suspension et sa distribution sont semblables à celles du carbonate de calcium.

4.4.4. Sulfate ferreux

Il est employé en coagulation et pour la précipitation de certains sels (CN^-, SI^-, $P0_4^{3-}$). Le produit cristallisé ($FeS0_4$, 7 H_2O) se présente sous forme de poudre verte. Il est parfaitement soluble dans l'eau. La saturation à 15 °C est atteinte pour 500 $g.l^{-1}$. Le contrôle de la concentration se fait par densimètre.

La mise en solution s'effectue dans des soutes en béton recevant directement le déchargement des bennes de produit et l'eau de dissolution. La reprise de la solution aqueuse est réalisée par un réseau de tuyauteries perforées, généralement situées en partie basse des soutes et noyées dans une couche de sable filtrant La préparation de solutions en deçà de la saturation étant malaisée, on travaille le plus souvent à partir de liqueurs saturées qui recristallisent facilement quand la température baisse. Pour éviter les inconvénients correspondants (dépôts, prise en masse dans la soute, bouchages de canalisations), plusieurs solutions sont possibles, dont le maintien à température constante.

Le pH des solutions aqueuses de sulfate ferreux est acide, et il est nécessaire de protéger les parties en contact avec le liquide, ou de les prévoir en matériaux plastiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. STOCKAGE, DOSAGE ET DISSOLUTION DES RÉACTIFS GAZEUX

5.1 CHLORE

Le chlore est l'agent oxydant et bactéricide le plus universel, mais il nécessite, pour des raisons de sécurité, le respect rigoureux de conditions particulières d'emploi. En dehors de son utilisation en prétraitement, il est employé en désinfection finale aux doses suivantes

- eau potable: de l'ordre du mg.l^{-1},
- piscine: de l'ordre de 1 à 5 mg.l^{-1},
- eaux usées (éventuellement) après traitement biologique: de l'ordre de la dizaine de mg.l^{-1},

et en désinfection périodique de réservoirs et réseaux de distribution d'eau potable, à des doses de l'ordre de 10 mg.l^{-1} avec temps de contact de 24 heures , ou de 30 mg.l-1 avec projection à la

lance sur les parois des ouvrages avant remplissage. Dans ce cas, l'utilisation d'eau de javel est généralement préférée.

. **Matériaux:** Le chlore **sec et froid** n' attaque pas les métaux courants, mais son agressivité est grande en présence d' humidité ou à chaud. Circuits et réservoirs doivent être maintenus parfaitement secs et protégés de tout échauffement

5.1.1. Principes de distribution et de dosage

Pour le stockage du chlore, il faut se reporter à la législation en vigueur, et aux indications générales du sous-chapitre 1 (dispositions générales).

À partir des récipients de stockage, la distribution du chlore vers l'organe de dosage (chloromètre) peut être réalisée

- soit sous forme gazeuse, pour les faibles débits,
- soit sous forme liquide pour les débits plus importants.

À la sortie du chloromètre, le chlore est véhiculé dissous dans de l'eau jusqu'à son point d'utilisation (concentration inférieure à 1 g.l^{-1}).

. **Distribution**

Pour maintenir un écoulement de chlore gazeux à partir d'un récipient de chlore liquide, il faut apporter les calories nécessaires à la vaporisation (chaleur latente de vaporisation 56 kcal.kg^{-1} à 20 °C). De façon pratique, un tank d'une tonne de chlore peut distribuer (sans apport extérieur de calories) environ 10 kg de chlore à l'heure dans un local maintenu à 20 °C. Pour les débits supérieurs, les calories doivent être apportées par un évaporateur (bain thermostaté à 80 °C environ), le soutirage du chlore s'effectuant à partir des tanks non plus en phase gazeuse, mais en phase liquide.

. **Dosage**

Le chlore gazeux issu, soit directement des bouteilles ou tanks, soit des évaporateurs, est dosé et détendu à la pression d'utilisation dans un appareil appelé **chloromètre.**

Le principe des chloromètres sous vide est fondé sur une variation de débit de chlore par modulation d'une dépression créée par un hydroéjecteur où s'effectue la dissolution du chlore gazeux dans l'eau motrice.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

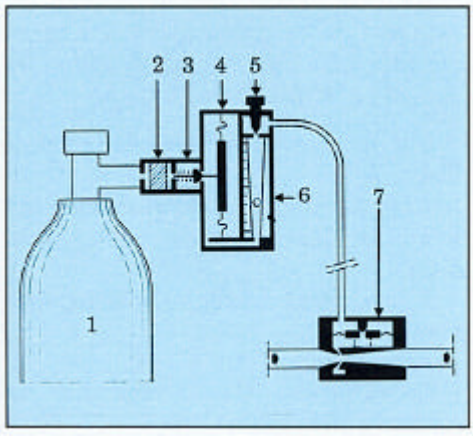
5.1.2. Appareils de dosage de chlore à fonctionnement sous vide

La technique des appareils fonctionnant sous vide s'est développée dans le double but d'assurer un arrêt automatique de la distribution de chlore s'il n'y a pas d'eau pour dissoudre celui-ci et aussi d'éviter un dégagement de chlore dans l'atmosphère si une fuite se produit.

Le vide est créé par un hydroéjecteur servant également à la dissolution du chlore dans l'eau.

. Chloromètre compact: ce type d'appareil, particulièrement adapté aux petits débits de chlore, peut se monter directement sur la tête de la bouteille de chlore; il y est quelquefois relié par une courte tuyauterie.

Les liaisons sont toujours les plus courtes, ce qui réduit les risques de fuite; en revanche, si le chloromètre est monté directement sur la bouteille, il est nécessaire de prendre des précautions lors des manutentions puisqu'il faut alors déposer le chloromètre, relativement fragile, à chaque changement de bouteille.



1 - Bouteille de chlore.
2 - Filtre.
3 - Soupape d'entrée
4 - Régulateur à membrane.
5 - Bouton de réglage .de chlore.
6 - Débitmètre.
7 - Hydroéjecteur.

Figure 714. Chloromètre compact. Schéma de principe.

Le principe de cet appareil est illustré par la figure 714. Le vide créé par l'hydroéjecteur (7) est réglé par le régulateur - détenteur à membrane (4) en fonction du débit de chlore désiré réglé lui-même par la vanne à pointeau (5) et contrôlé sur le débitimètre (6). Dans certains appareils, le régulateur est constitué par deux détendeurs à membrane placés en série.

Suivant le vide créé, la membrane du régulateur se déplace en entraînant un pointeau constituant la soupape d'entrée de chlore (3). A l'arrêt un clapet antiretour, incorporé à l'hydroéjecteur, empêche toute remontée d'eau dans l'appareil. En cas de rupture accidentelle ou de fuite dans la tuyauterie qui relie l'hydroéjecteur au doseur, le vide est rompu sur la membrane du régulateur - détendeur (4) entraînant la fermeture de la soupape d'arrivée de chlore (3).

Des perfectionnements ont été apportés sur la plupart des modèles, en particulier

- la possibilité de montage séparé de l'ensemble "débitmètre de chlore et vanne de réglage": on monte alors cet ensemble dans une salle de commande, tandis que la bouteille de chlore et le reste du chloromètre (soupape d'entrée du chlore et détendeur - régulateur) sont installés dans un local technique ou à l'extérieur,
- la possibilité de passage automatique par inversion d'une bouteille de chlore à une autre, après vidange du récipient en service,
- la signalisation "bouteille vide" ou "manque de chlore".

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- CHLOROMÈTRE D 105: montage sur bouteille

Ce type de chloromètre "compact" est adapté à des dosages compris entre 5 et 4000 $g.h^{-1}$ de chlore.

Les figures 715 et 716 montrent

- un chloromètre compact monté directement sur la bouteille de chlore,
- un exemple d'installation de chloromètre séparé avec ses bouteilles et son dispositif d'injection dans la canalisation d'eau à chlorer.

. **Chloromètres à gros débit:** les chloromètres à gros débit fonctionnent comme les précédents, sous vide modulé (figure 717). Leur capacité peut atteindre 200 $kg.h^{-1}$.

5.1.3. Détection et neutralisation des fuites de chlore

Le chlore est un gaz jaune verdâtre, à odeur irritante. Deux fois et demie plus lourd que l'air, il stagne au ras du sol en cas de fuite.

Pour les stockages d'une certaine importance, la législation française impose l'installation, dans un local séparé, d'un détecteur de fuites de chlore et d'un dispositif de neutralisation de ces fuites.

Le local de neutralisation comprend (figure 718)

- un ventilateur d'air chloré à neutraliser, - une tour de neutralisation avec anneaux de contact,
- une cuve de stockage de la solution neutralisante,
- le détecteur de fuite,
- les armoires électriques de contrôle - commande du poste de chlore.

Les aspirations du détecteur de fuite et du ventilateur d'air chloré sont situées en partie basse du local de stockage.

La solution neutralisante est généralement un mélange de soude et d'hyposulfite de sodium. L'hyposulfite permet la réduction de l'hypochlorite fourni par

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

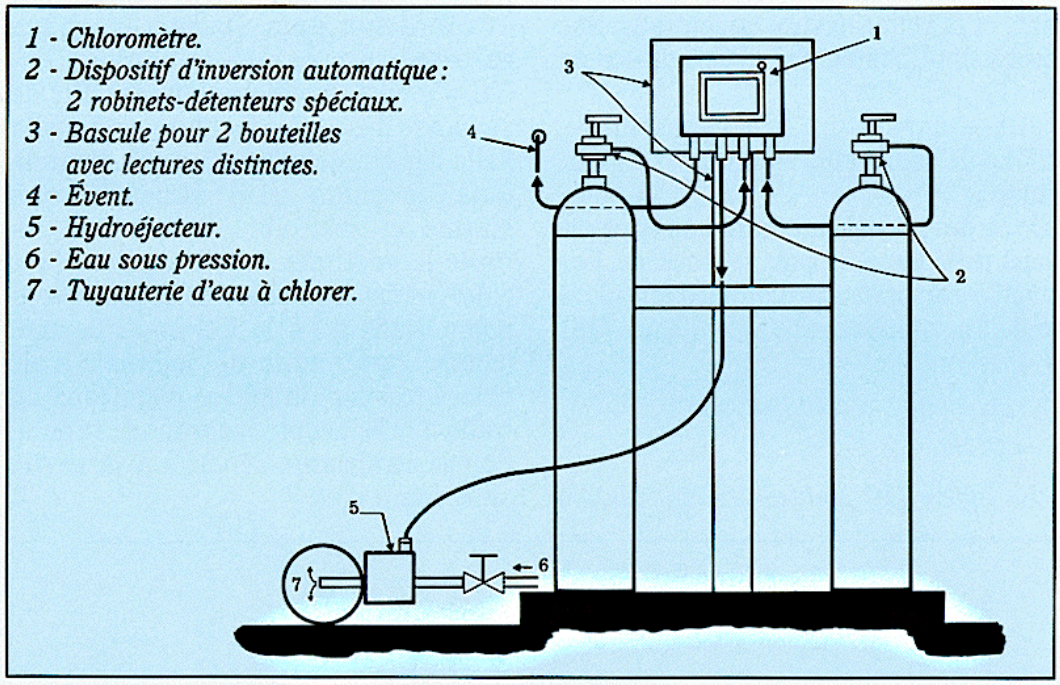


Figure 716. Chloromètre compact séparé et dispositif d'injection.

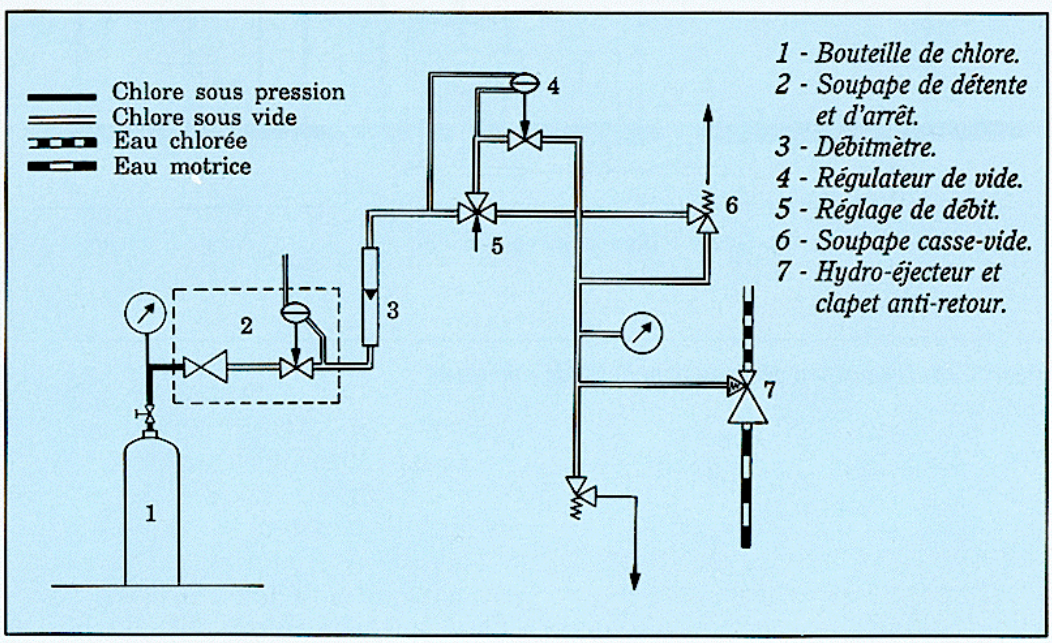


Figure 717. Chloromètre à gros débit.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

action du chlore sur la soude de la solution, et la soude assure la neutralisation de l'acidité libérée par action du chlore sur l'hyposulfite.

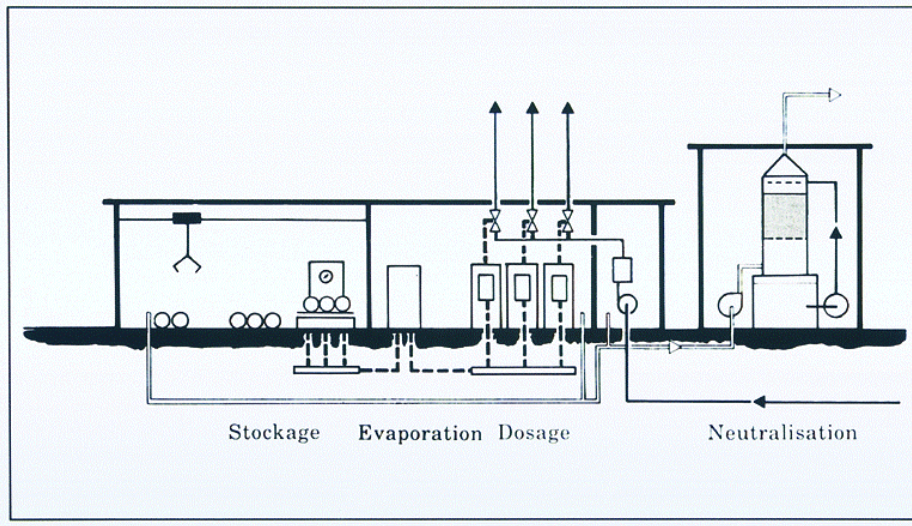
Il faut environ 1,1 kg d'hyposulfite et 1,7 kg de soude pour neutraliser 1 kg de chlore.

Pour des raisons de sécurite, on implante dans des locaux séparés le stockage, l'ensemble évaporateurs-chloromètres, puis la tour de neutralisation de fuites (figure 718).

5.1.4. Schéma d'installation complète

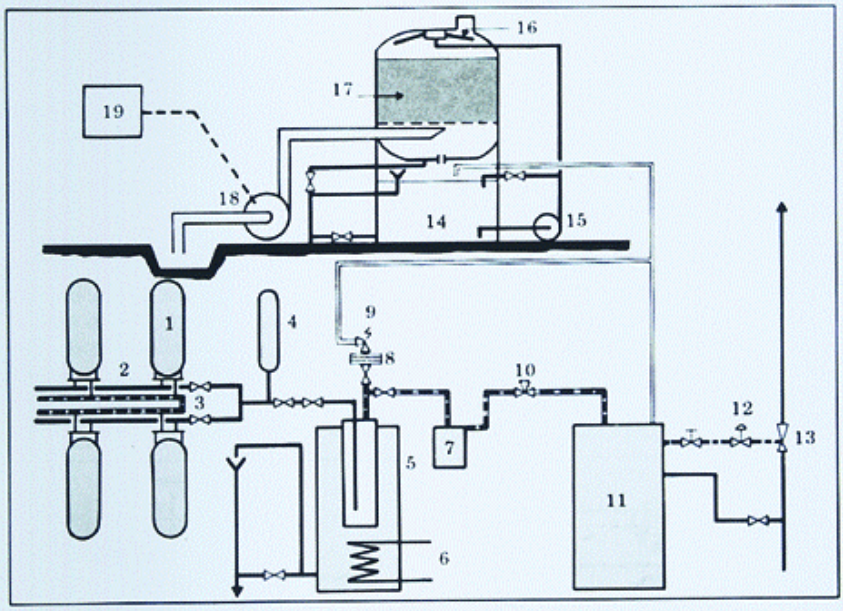
La figure 719 montre une installation de stockage, soutirage en phase liquide, évaporation puis dosage en phase gazeuse.

S'il y a fuite de chlore dans la salle de stockage des tanks à chlore ou dans la salle des chloromètres, un détecteur de fuite de chlore (19) déclenche une alarme et met automatiquement en route le ventilateur (18) aspirant l'air chloré dans les salles intéressées et la pompe (15) de solution neutralisante (soude, hyposulfite de sodium). L'air chloré traverse la masse d'anneaux de contact (17) à contre-courant de la solution neutralisante répartie à la partie supérieure (16).



Disposition générale d'un poste de chloration.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 · *Tank à chlore.*
2 · *Circuit chlore liquide.*
3 · *Circuit chlore gazeux.*
4 · *Bouteille d'expansion.*
5 · *Évaporateur.*
6 · *Résistance chauffante.*
7 · *Filtre à chlore.*
8 · *Disque d'éclatement.*
9 · *Soupape de sûreté.*
10 · *Vanne détendeur.*
11 · *Chloromètre.*
12 · *Vanne automatique d'isolement.*
13 · *Éjecteur d'aspiration.*
14 · *Tour de neutralisation.*
15 · *Pompe de solution neutralisante.*
16 · *Rampes de pulvérisation.*
17 · *Anneaux de contact.*
18 · *Ventilateur d'air chloré.*
19 · *Détecteur de fuite.*

Poste complet de stockage et distribution de chlore.

5.2. GAZ CARBONIQUE CO_2

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le gaz carbonique est employé en reminéralisation d'eau potable, en combinaison avec la chaux, et également en neutralisation (voir page 274). En neutralisation, il permet une régulation précise du pH grâce à un dosage fin et à une courbe de neutralisation plus progressive que celle obtenue avec les acides forts.

En reminéralisation, environ 9 g de CO_2 et 7,5 g de $Ca(OH)_2$, sont requis pour apporter 1 degré de TAC à 1 m^3 d'eau.

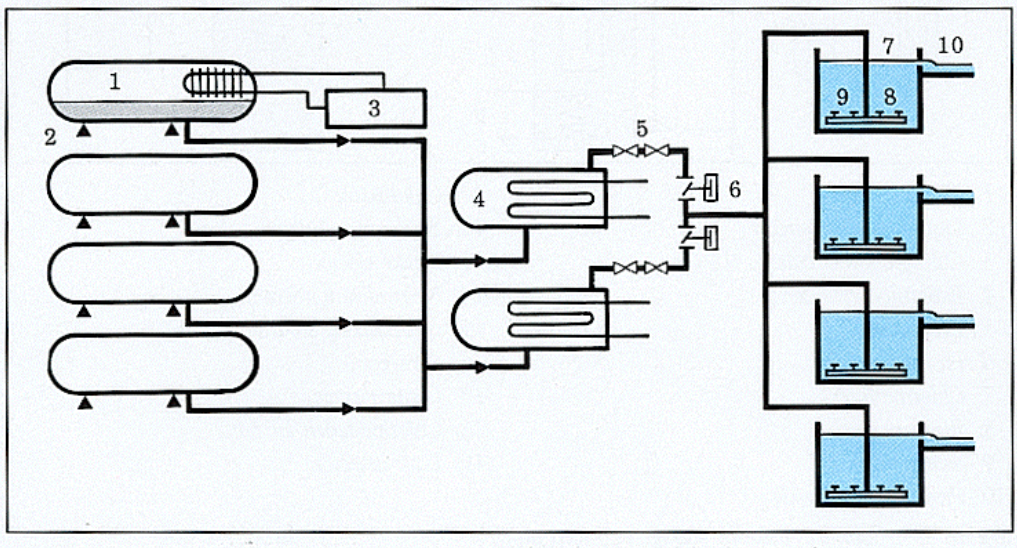
5.2.1. Principe d'une unité d'injection de CO_2

Bien que le gaz carbonique puisse être produit à partir de brûleurs immergés dans l'eau à traiter (RECARBONATOR type P), la méthode la plus courante utilise le CO_2 stocké à l'état liquide dans des réservoirs sous pression calorifugés et réfrigérés (pression 20 bars, température - 20 °C). Le CO_2 liquide soutiré est vaporisé dans des évaporateurs (apport extérieur de calories), puis détendu aux conditions d'utilisation (3 bars à 12 °C). Il est enfin injecté, à l'état gazeux, dans l'eau à traiter par l'intermédiaire de disques diffuseurs poreux immergés sous quel ques mètres d'eau dans des tours de contact

5.2.2. Exemple de réalisation

La figure 720 se réfère à l'unité de reminéralisation d'eau potable de la ville de LISBONNE-ASSEICEIRA.

La capacité totale de l'installation est réglable de 200 à 850 $kg.h^{-1}$ de CO_2. Le débit est asservi au débit d'eau à traiter, au taux de traitement désiré et éventuellement au pH de l'eau reminéralisée, ceci grâce à des vannes de régulation situées sur le circuit gazeux, elles-mêmes pilotées par des régulateurs qui reçoivent leurs instructions d'un automate programmable contrôlant le procédé.



1. *Liquid CO_2 storage tanks (50 t per tank).*
2. *Electronic scales.*
3. *Cooler units.*
4. *Evaporators.*
5. *Pressure release.*
6. *Flow rate control valves.*
7. *Dissolving-contact towers.*
8. *Porous discs.*
9. *Alkalinized water.*
10. *Remineralized water.*

Figure 720. Lisbon-Asseiceira plant. Complete CO_2 storage and feed unit.

1 - Citernes de stockage de CO, liquide (50 t unitaire).
2 - Pesons électroniques.
3 - Armoires frigorifiques.
4 - Évaporateurs.
5 - Détendeurs.
6 - Vannes de régulation de débit.
7 -Tours de dissolution-contact.
8 -Disques diseurs poreux.
9 - Eau alcalinisée.
10 - Eau remineralisée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 720. Installation de LISBONNE-ASSEICEIRA. Poste complet de stockage et distribution de CO_2

5.3. AMMONIAC NH_3

Le transport et le stockage de lessives concentrées (64 % en NH_4OH) ne sont pas envisageables en été en raison du risque d'échauffement et donc de surpression; le conditionnement normal est aussi sous forme d'ammoniac liquide, non réfrigéré, en récipients timbrés, et sous des pressions de 6 bars à 10 °C et 12 bars à 30 °C. Le transfert doit en être effectué selon les recommandations de sécurité propres aux pays concernés.

La décompression du liquide à la pression atmosphérique le refroidit à - 31 °C (voir page 514). Le maintien de la pression gazeuse peut être assuré par échangeur thermique de réchauffement situé sur la tuyauterie de transfert et équipé de dispositifs interdisant à l'arrêt le gel de l'eau de réchauffement

La réaction de dissolution du gaz dans **l'eau** est exothermique (34 à 40 kJ par mole de NH_3, en solutions en-dessous de 10 %).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. ÉLABORATIONS PARTICULIÈRES

6.1. MISE EN OEUVRE DES POLYMÈRES

Il faut distinguer

- les polymères type polyamine utilisés comme coagulants,
- les polymères type polyacrylamide utilisés comme floculants.

6.1.1. Préparation des polyamines

D'une façon générale, ces polymères de faible masse molaire sont tous commercialisés sous forme de solutions peu visqueuses (50 à 400 centipoises). Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer de préparations préalables. Ces produits peuvent être pompés directement à partir d'un fût ou d'un conteneur. Ceci est un avantage certain d'autant plus que ces produits sont très stables.

Par contre, il est impératif de prévoir une bonne dilution secondaire au refoulement de la pompe doseuse (dilution 100 à 200), avec de l'eau claire de salinité faible (si possible inférieure à 200 $mg.l^{-1}$).

Il est cependant toujours possible d'envisager une préparation de ces polymères en solution-mère, mais il faut savoir, que dans ce cas, la stabilité du produit est souvent réduite et dépend de la qualité de l'eau de préparation (salinité inférieure à 200 $mg.l^{-1}$ et turbidité inférieure à 1 NTU). Il est recommandé d'avoir une solution-mère la plus concentrée possible (10 % au moins). On peut alors prévoir une stabilité d'environ 48 heures.

6.1.2. Préparation des polyacrylamides

Les polyacrylamides sont des polymères de très haute masse molaire utilisés comme floculants. On trouve essentiellement ces polymères sous forme de poudre ou d'émulsion.

Ces produits existent quelquefois sous forme de solutions très visqueuses (5 000 à 8 000 centipoises) qui peuvent être pompées telles quelles avec dilution secondaire au refoulement de la pompe doseuse.

6.1.2.1. Polyacrylamides en poudre

La mise en solution des floculants en poudre demande certaines précautions

- les solutions, même diluées, sont très visqueuses,
- les floculants sont sujets à une dégradation mécanique en cas d'agitation trop rapide,
- les floculants ont tendance à former des "grumeaux" s'ils ne sont pas dispersés dans de bonnes conditions.

Concentration de préparation: 2 à 5 $g.l^{-1}$.

. **Préparation manuelle**

Le skid (figure 721) comprend

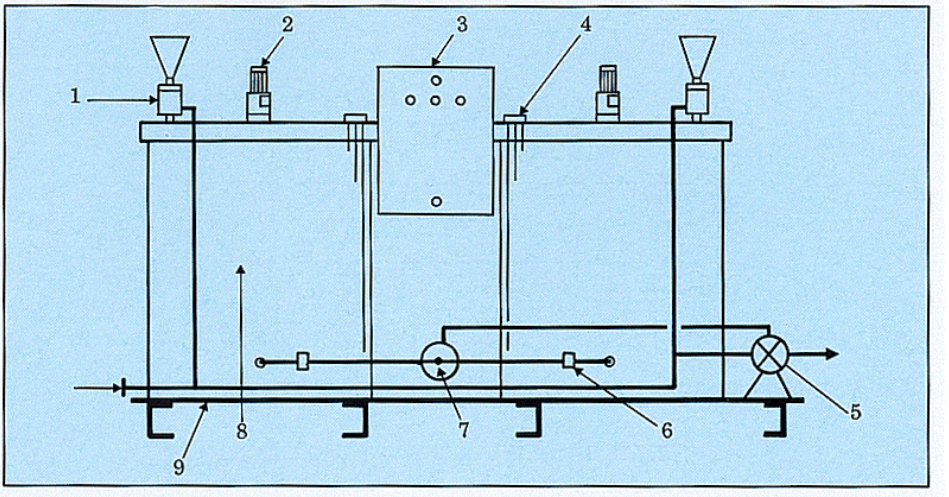
- 2 stations de préparation manuelle,
- 1 armoire automatique,
- 1 système de dilution,
- 1 ou 2 pompes doseuses,
- des sondes de contrôles de niveau.

Temps de préparation: 45 à 60 minutes.

. **Préparation automatique**

Une station (figure 722) se compose d'une cuve principale cloisonnée en trois

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1. Powder disperser.
2. Low-speed electric stirrer.
3. Automatic control switchboard.
4. Level regulation.
5. Dilution system.
6. Solenoid valve.
7. Metering pump.
8. HD polyethylene tank.
9. Support skid.

Figure 721. Manual skid for the preparation of powdered polymers.

1 - Disperseur de poudre.
2 - Électro-agitateur à vitesse lente.
3 - Armoire d'automatisme.
4 - Régulations de niveau.
5 - Système de dilution
6 - Eléctrovanne
7 - Pompe doseuse.
8 - Cuve en P.E.H.D.
9 - Châssis support

Figure 721. Skid de préparation manuelle de polymère en poudre.

bacs successifs avec transvasement par débordement

- un premier bac dit de préparation reçoit l'eau régulée en pression et débit, ainsi que la poudre dosée au moyen d'un doseur à vis assurant une chute régulière du produit sur le disperseur,
- un deuxième bac dit de maturation assure un temps de séjour nécessaire au "gonflement" des chaînes moléculaires du floculant,
- un troisième bac dit de stockage est muni d'une régulation permettant d'automatiser la station

. niveau très haut: alarme (sécurité),

. niveau haut: arrêt eau temporisée + arrêt poudre,

. niveau bas: admission eau temporisée + admission poudre,

. niveau très bas: arrêt pompe doseuse (sécurité).

Remarque

il est souhaitable d'installer les postes de préparation automatique dans un local séparé.

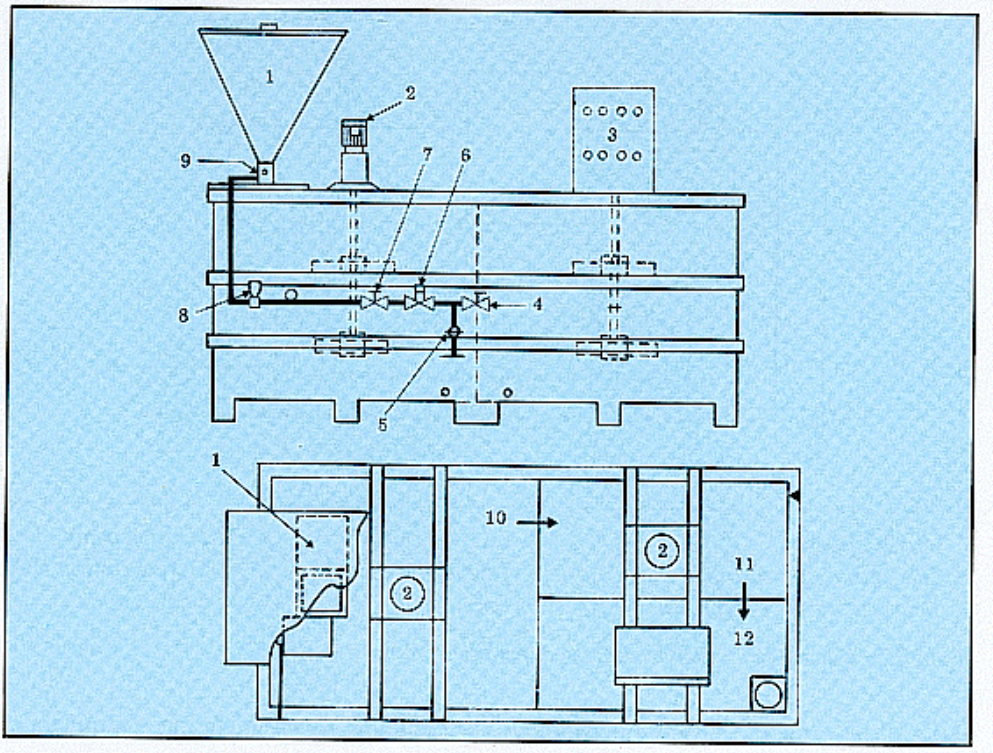
6.1.2.2. Polyacrylamide en émulsion

. **Préparation manuelle**

En manuel, la préparation des émulsions s'effectue de la même façon que pour les poudres mais le disperseur est inutile.

La concentration de la solution-mère est de 5 à 10 $g.l^{-1}$ et le temps de préparation est limité à 15-20 minutes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1. Powder feed device with hopper.
2. Slow stirrer.
3. Automatic control unit.
4. Shut-off valve.
5. Pressure regulator.
6. Solenoid valve.
7. Regulation valve.
8. Flowmeter.
9. Powder wetter.
10. Preparation tank.
11. Ripening tank.
12. Storage tank.

Figure 722. Automatic skid for the preparation of powdered polymers.

1 - Doseur à poudre avec trémie.
2 - Agitateur vitesse lente.
3 -Armoire d'automatisme.
4 -Vanne d'arrêt.
5 - Régulateur de pression.
6 - Électrovanne.
7 - Vanne de réglage.
8 - Débitmètre.
9 - Mouilleur de poudre.
10 - Bac de préparation.
11 - Bac de maturation.
12 - Bac de stockage

Figure 722. Skid de préparation automatique de polymère en poudre.

. **Préparation automatique**

L'ensemble de préparation (figure 723) comprend:

- une pompe doseuse (1) qui permet de pomper l'émulsion à partir d'un fût ou d'un conteneur (2),
- un casseur d'émulsion (3),
- une régulation de niveau (5-6) dans le bac de préparation (4) (niveau haut niveau bas),
- une armoire de commande qui automatise l'ensemble.

Pour assurer l'efficacité des polymères, il est indispensable d'assurer une dilution importante de la solution préparée. Cette dilution en ligne est réalisée sur le refoulement de la pompe doseuse. Le taux de dilution finale dépend de la

nature des polymères et du produit à traiter

- en traitement de boues, concentration de 0,5 à 1 g^{-1},
- en clarification, concentration de 0,05 à 0,1 g. 1^{-1}.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.1.3. Dilution en ligne

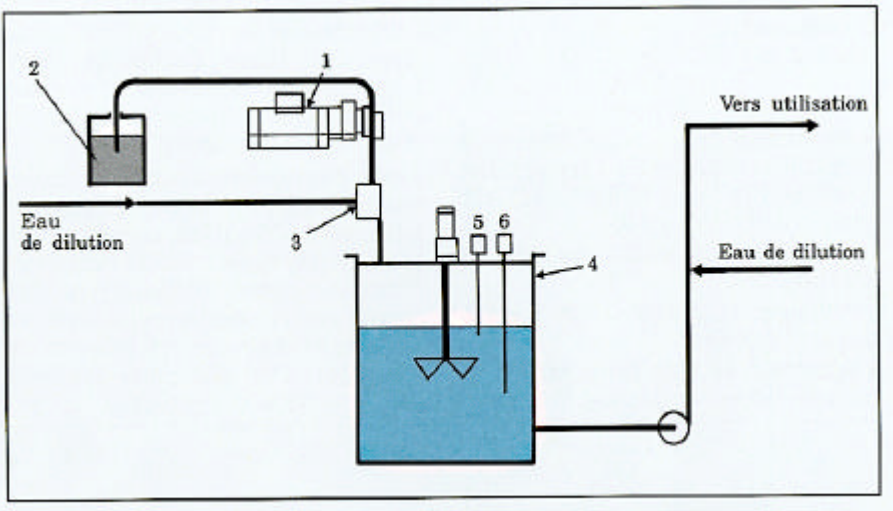


Figure 723. Poste de préparation automatique de polymère en émulsion et dilution en ligne.

6.2. EXTINCTION CHAUX VIVE (CaO)

La chaux vive est utilisée dans le traitement des eaux surtout sous forme de poudre. Ses avantages sur la chaux éteinte sont:

- prix moins élevé,
- plus grande richesse en CaO que la chaux éteinte, sauf en cas d'hydratation, -densité apparente plus élevée, ce qui implique de moindres coûts de transport et de stockage
- chaux vive: densité apparente: 0,7 à 1,1,
- chaux éteinte: densité apparente 0,3 à 0,6.

Par contre, la chaux vive présente deus inconvénients:

- investissement supplémentaire pour assurer une bonne extinction,
- qualité des chaux vives souvent plus variable que celle des chaux éteintes.

L'extinction de la chaux vive suivant la réaction

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2,$$

est effectuée avec un excès d'eau. La réaction est exothermique et la chaleur dégagée à 25 °C est de 275 kcal par kg CaO (voir page 504).

La réactivité chimique du lait de chaux liée à la (messe de la suspension est fonction de la température d'extinction. Celleci doit être la plus élevée possible, avec un apport d'eau minimal.

6.2.1 Chaux vive en poudre

Les chaux vives utilisées pour le traitement des eaux et des boues doivent

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

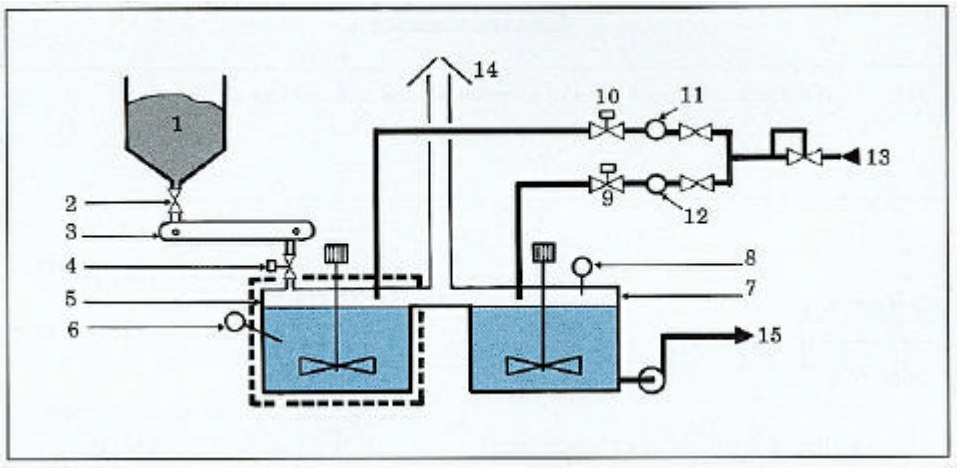
généralement répondre aux spécifications suivantes:

- teneur en CaO > 90 %,
  MgO < 1,5 %,
  SO_4 < 1,0 %,
- réactivité à l'eau: temps inférieur à 25 min pour atteindre 60 °C à partir d'un mélange 150 g chaux/600 g eau à la température initiale de 20 °C,
- -chaux fine ou tamisée (granulométrie 0-90 µm).

Pratiquement, deux types de préparation sont utilisées

. **extincteur de pâte** (avec énergie de mélange élevée): on mélange trois à qua tre parties d'eau à une partie de chaux, l'élévation de température est maximale et le temps d'extinction court. L'apport d'eau est fonction de la viscosité de la pâte (couple du malaxeur) et/ou de la température,

. **extincteur de suspension:** la concentration en $Ca(OH)_2$ du lait de chaux est inférieure à 200 $g.l^{-1}$; le capteur de température agit, en sécurité, sur l'arrivée de chaux. Ce type d'installation (figure 724), bien qu'ayant un rendement moindre, est plus simple et plus facile à automatiser, ce qui réduit les contraintes d'exploitation, de sécurité et d'entretien.



1 - Silo de chaux en poudre.
2 - Obturateur manuel.
3 - Doseur à chaîne.
4 - Obturateur automatique de sécurité.
5 - Réacteur extincteur calorifugé.
6 - Thermomètre déclenchant une alarme et l'arrêt du doseur.
7 - Cuve de dilution et de stockage.
8 - Capteur de niveau à ultrasons commandant le fonctionnement de l'extincteur.
9-10 - Vannes automatiques.
11-12 - Débitmètres déclenchant une alarme et l'arrêt du doseur.
13 - Eau.
14 - Évacuation des buées.
15 - Utilisation du lait de chaux.

figure 724. Installation de HUNINGUE (Haut-Rhin) pour SANDOZ. Extincteur de suspension.

6.2.2. Chaux vive en granulés (0 -20 mm)

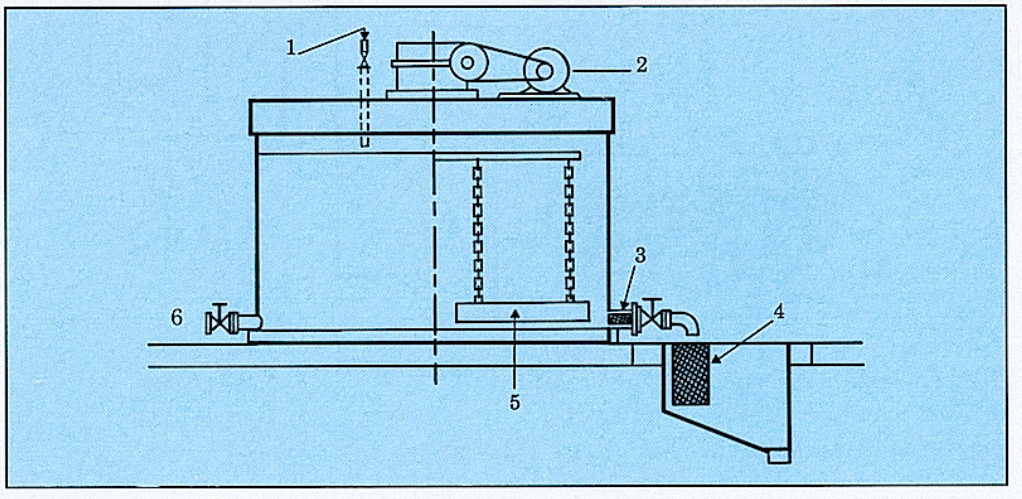
On peut utiliser un extincteur à pâte comportant une chambre d'extinction à auge fixe horizontale, avec système de malaxage à pales et une chambre de dilution et d'évacuation mécanique des produits.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.2.3. Chaux en roche (10 - 60 mm)

On peut utiliser:

soit un système continu de grande capacité (1-10 $t.h^{-1}$) comprenant - un tambour cylindrique horizontal à rotation lente équipé de pales de brassage et de paniers de relevage de la chaux et d'une séparation primaire, - un épurateur à extraction mécanique des incuits, soit un système par bâchées (figure 725) de petite capacité (1-2 tj^{-1}), appareil rustique à écrasement des roches par masselottes ou pales racleuses suspendues.



1. *Water inlet.* 3. *Internal sieve.* 5. *Scraper.*
2. *Drive system.* 4. *External sieve.* 6. *Drain.*

Figure 725. Slaking plant for crystal quick lime working by the tankload.

1 - Entrée d'eau. *3 - Tamis interne.* *5 - Pale racleuse.*
2 - Système d'entraînement. *4 - Tamis externe.* *6 - Vidange.*
Figure 725. Extincteur de chaux vive en roche, fonctionnant par *bâchées.*

6.3. DIOXYDE DE CHLORE

Le dioxyde de chlore est un composé instable qui doit être préparé en solution sur les lieux de son utilisation. Il s'obtient par oxydation d'une solution de chlorite de sodium, à l'aide de chlore ou d'acide chlorhydrique.

6.3.1. Oxydation du chlorite de sodium par le chlore

$$2\,NaClO_2 + Cl_2 \rightarrow 2\,ClO_2 + NaCl$$

Stoechiométriquement, pour produire 1 g de CO_2, il faut 1,34 g de chlorite de sodium et 0,526 g de chlore.

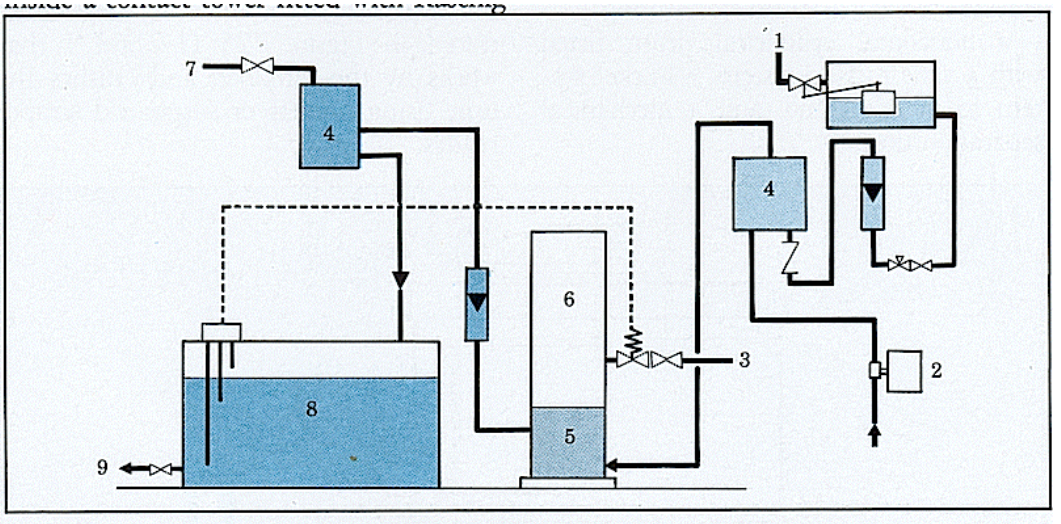
Ce procédé intéresse les installations qui disposent de chlore gazeux utilisé en préoxydation ou en un point quelconque de la ligne de traitement Le pH de l'eau de chlore doit être compris entre 1,7 et 2,4. Sa concentration peut varier entre 2,5 et 6 g.l-1 Cl_2.

Dans le cas d'eau à fort TAC, il est nécessaire d'utiliser de l'eau de chlore et que sa concentration soit la plus élevée possible.

La figure 724 schématise une unité de production de ClO_2 au chlore. L'eau de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

chlore est mise en contact avec la solution concentrée de NaClO2 (solution commerciale à 310 g.1 $^{-1}$) au sein d'une tour de contact garnie d'anneaux Rasshig. Le temps de contact au sein de cette tour doit être inférieur à 10 minutes (optimum = 6 min).



1. Softened water. *4. Dilution.* *7. Water.*
2. $NaClO_2$ metering pump. *5. Chlorinator.* *8. Storage tank.*
3. Fresh water. *6. Reactor.* *9. To point of use.*

Figure 726. Preparation of ClO_2 using chlorine.

1 - Eau adoucie. *5 - Chloromètre.* *7 - Eau.*
4 - Dilution. *3 - Eau douce.* *8 - Bac de stockage.*
2 - Pompe doseuse de $NaClO_2$. *6 - Réacteur.* *9 - Vers utilisation.*

Figure 726. Préparation de ClO_2 à partir de chlore.

La solution de dioxyde de chlore est transférée par l'eau motrice d'un hydroéjecteur dans un bac de stockage avant distribution dans l'eau du réseau. Dans ce bac, la solution de ClO_2 est diluée (0,5 à 1 gl^{-1}) et reste stable plus longtemps (2 4 h). Pratiquement, en considérant un excès de chlore de 10 % par rapport à la stoechiométrie et un rendement de 95 %, il faut, pour produire 1 g de ClO_2, 1,41 g de chlorite de sodium pur et 0,61 g de chlore.

6.3.2. Action de l'acide chlorhydrique sur le chlorite de sodium

On a la réaction suivante:

$5\ NaClO_2 + 4\ HCl \rightarrow 4\ ClO_2 + 5\ NaCI + 2\ H_2O$

Stoechiométriquement il faut 1,67 g de $NaClO_2$ pour produire 1 g de ClO_2

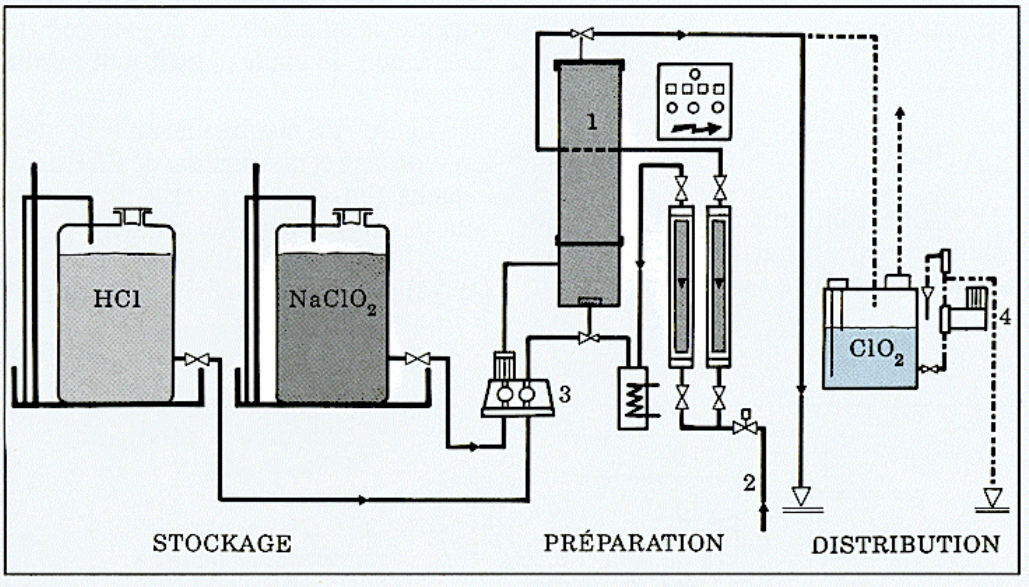
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ce procédé de fabrication du ClO_2 est mis en place dans les usines qui ne **disposent pas de chlore gazeux ou de possibilité de stockage de chlore gazeux.**

La figure 727 présente une installation de ClO, qui utilise des réactifs concentrés dilués à l'entrée du réacteur:

- chlorite de sodium en solution à 25 (310 g.l^{-1}),
- acide chlorhydrique en solution à 3 2 (370 g.l^{-1}).

La solution de $C10_2$ est reprise par hydroéjecteur et aussi diluée dans un bac de stockage (à un volume de chlorite de sodium à 25 % doivent correspondre environ 0,65 vol., au moins, d'acide chlorhydrique concentré à 32 % et 6 vol. d'eau de dilution primaire pour obtenir une solution de dioxyde chlore à 17 g.l^{-1}. Un litre de $NaClO_2$ à 25 % donne 125 g de ClO_2. Le temps de réaction optimal est de 6 minutes.



1 - Réacteur. 2 - Eau du réseau. 3 - Pompe doseuse. 4 - Pompe.

Figure 727. Préparation de ClO_2 à partir de HCl.

6.3.3. Distribution des solutions de dioxyde de chlore

Si elle n'est pas diluée à la sortie du réacteur, la solution concentrée de ClO_2 doit être distribuée immédiatement En effet cette solution n'est pas stable et se décompose en $C1O_3$- et $C1O_2$-. Après dilution, les solutions diluées de ClO_2 peuvent être distribuées immédiatement (concentration en ClO_2 comprise entre 0,5 et 1 $g.l^-$) ou pendant 24 h au maximum à cette concentration avant le traitement de désinfection.

6.3.4. Précautions à prendre pour l'emploi des réactifs

. Préparation de la solution de chlorite de sodium

Les solutions de chlorite de sodium peuvent être préparées à partir de chlorite de sodium en poudre. Il est nécessaire, pour éviter la précipitation de carbonate de calcium, d'utiliser de l'eau préalablement adoucie.

. Stockage des solutions

Les solutions concentrées de $NaClO_2$ sont sensibles au froid. Pour une solution à 25 % de $NaClO_2$ le début de cristallisation se situe vers 10 °C.

Les solutions de chlorite de sodium et d'acide chlorhydrique doivent être stockées dans des locaux réchauffés à 15 °C. En effet, la cinétique de formation du ClO_2 décroît quand la température des réactifs et de l'eau de dilution est inférieure à 15 °C.

. **Manutention**

À cause de ses propriétés oxydantes, le chlorite ne doit pas entrer en contact avec les matières réductrices:

- le soufre et ses dérivés ou les produits en contenant,
- les matières organiques,
- les métaux en poudre, etc.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.4. CHARBON ACTIF EN POUDRE (CAP)

Le CAP est un produit dont la masse volumique varie beaucoup en fonction de sa fluidisation ou de son tassement (200 à 600 $kg.m^{-3}$). Cette variation de masse volumique entraîne des risques soit de fluage, soit de voûtage qu'il faut savoir prévenir.

La figure 728 montre une unité de stockage, dosage et distribution de CAP dans laquelle tous les transferts de poudre sont pneumatiques. Elle comporte:

(1) - Un dispositif de dépotage.

(2) - Un silo avec ses organes de contrôle,

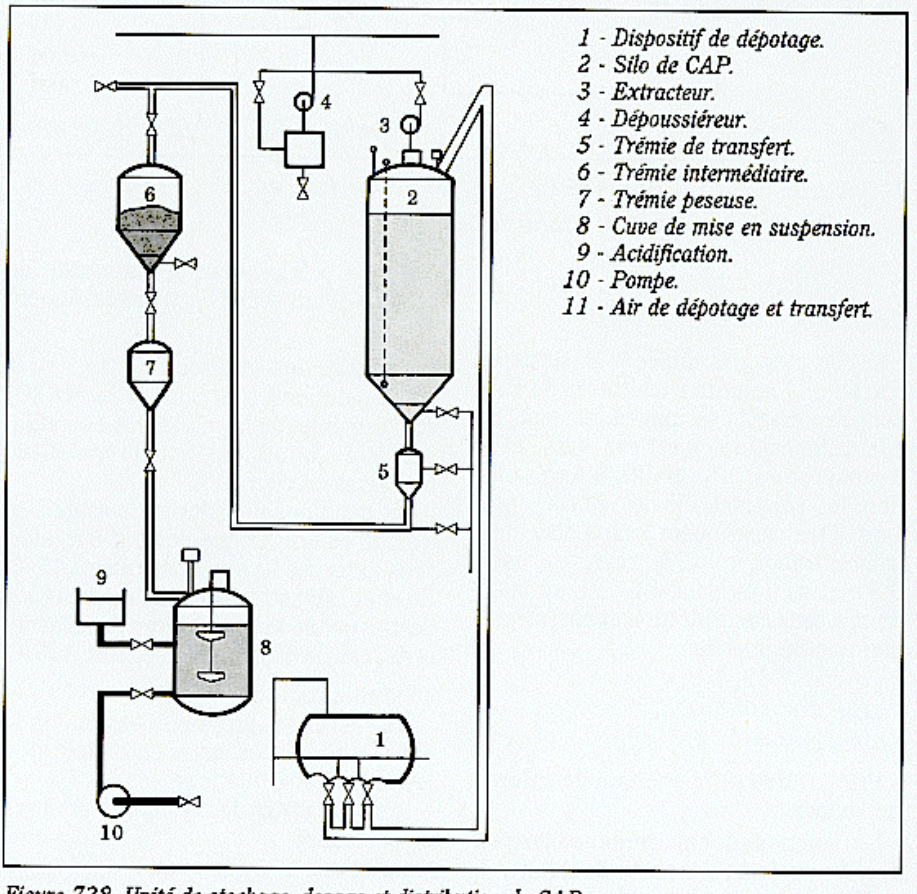


Figure 728. Unité de stockage, dosage et distribution de CAP.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de sécurité, de fluidisation et de filtration d'air à sec (3) et par voie humide (4).

(5) - Une trémie de transfert pneumatique du produit vers la trémie intermédiaire de stockage.

(6) - Une trémie intermédiaire de stockage.

(7) -Une trémie peseuse, avec dosage automatique asservi au taux de traitement et au débit d'eau à traiter.

(8) - Une cuve de mise en suspension.

(9) - Un dispositif d'acidification (acide ou gaz carbonique) pour compenser l'alcalinité du charbon.

(10) - Une pompe de transfert de la suspension de CAP

À niveau bas dans la trémie (6), il y a remplissage et vidange successifs de la trémie de transfert (5) par voie pneumatique (mise en pression de la trémie et ouverture d'une vanne automatique).

Le transfert est arrêté à niveau haut dans la trémie (6). Celle-ci alimente, toujours par voie pneumatique, la trémie peseuse (7), dont la cadence de remplissage et la quantité de CAP pesée sont liées au taux de traitement et au débit d'eau à traiter.

La cuve de mise en suspension (8) réalise le mélange CAP - eau de transfert. La suspension est pompée à débit continu vers le point d'utilisation.

Le choix des matériaux et équipements doit tenir compte du caractère **abrasif** du produit

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 729. Installation de LA ROCHE (Loire Atlantique) pour la aille de NANTES. Installation de dosage de CAP. Débit. 98 kg.h^{-1}

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

21
MESURE, CONTRÔLE,RÉGULATION, AUTOMATION, SUPERVISION

1. MESURE

1.1. GÉNÉRALITÉS

Le contrôle permanent et automatique des processus de traitement implique la mesure d'un certain nombre de paramètres. Ceux-ci peuvent se classer en deux grandes familles: celle des paramètres usuels et celle des paramètres spécifiques de l'eau.

Les PARAMÈTRES USUELS sont principalement les débits, les niveaux de liquides ou de solides, les pressions, les températures.

Dans toute installation de traitement d'eau, la connaissance du débit d'eau est impérative.

Le traitement d'une eau conduit à lui ajouter un certain nombre de réactifs. Ceux-ci sont généralement stockés soit sous forme liquide dans des bâches, soit sous forme pulvérulente dans des silos

la mesure des niveaux de produit dans ces stockages permet de connaître à chaque instant l'autonomie prévisionnelle de l'installation et d'établir un planning de livraison de ces produits. Ces mesures de niveau s'appliquent également aux différents réservoirs de stockage (eau traitée, boue, etc.).

Dans ces installations, les mesures de **pression** sont nombreuses: au refoulement des pompes, dans les enceintes sous pression, filtres, ballons aéro-hydrauliques, dégazeurs, etc. La bonne conduite d'une installation de filtration nécessite la connaissance permanente du degré de colmatage des lits filtrants qui est généralement donnée par une mesure de pression différentielle, ou simplement de pression, dans le cas du fonctionnement d'un filtre ouvert à niveau constant

La mesure de la température est essentielle dans les traitements thermiques (dégazage, strippage, conditionnement thermique, incinération, séchage, etc.). Elle est souvent utile sur les réacteurs biologiques, en particulier en méthanisation et quelquefois en floculation d'eau froide.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La mesure en continu de la résistivité ou de son inverse, la conductivité est impérative pour le contrôle des eaux de très haute pureté (générateurs de vapeur HP, fabrication de semi-conducteurs, etc.). Chaque électrolyte ayant sa propre conductivité, la mesure de résistivité ne peut, pour les eaux naturelles, se traduire en mesure de salinité que si les proportions des différents sels dissous restent constantes.

La mesure en continu d'un certain nombre de PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES permet de libérer le technicien de l'astreinte d'analyses de routine et d'optimiser les traitements en réduisant le temps de réponse. Elle porte principalement sur la turbidité, la résistivité, le pH, le rH, la concentration de certains corps dissous.

La **turbidité** est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle permet de connaître le degré de pollution physique des eaux à traiter ainsi que la qualité d'une eau livrée à la consommation humaine. Des corrélations sont souvent établies entre turbidité et teneur en MES.

La mesure en continu du pH d'une eau, pratiquée à de très nombreux stades de traitement, est en particulier utilisable en contrôle de floculation, décarbonatation, désinfection, neutralisation, etc.

La mesure du rH associée au pH permet le contrôle de réactions d'oxydoréduction.

La mesure en continu de l'oxygène dissous permet de contrôler le maintien des conditions aérobies dans les installations d'épuration par voie biologique, ainsi que les conditions nécessaires à la vie aquatique dans les eaux de surface.

Le souci légitime de ne pas rejeter dans le milieu naturel des produits nocifs, de ne pas livrer à la consommation humaine d'eaux polluées par ces produits, conduit à la mesure de la concentration de ces substances. Ainsi, par exemple, sont mesurées les concentrations en phénols, hydrocarbures, chrome, cyanure, détergents, etc. Le danger que constitue la présence de la silice dans l'eau d'alimentation des chaudières, la nécessité de maintenir parfois une certaine teneur en phosphate dans les circuits, conduisent obligatoirement à la mesure des concentrations de ces corps.

De même, la mesure de l'alcalinité et de la dureté permet, par le maintien des valeurs de ces paramètres en deçà de certaines limites, d'éviter les phénomènes d'entartrage.

Le contrôle habituel de la désinfection se fait par la mesure de la quantité résiduelle de l'agent désinfectant (chlore, brome, ozone, etc).

Dans le domaine du traitement des eaux résiduaires par le procédé des boues activées, la mesure automatique du pourcentage volumique de boues peut être réalisée par un sédimomètre.

La mesure en continu de la demande chimique en oxygène (DCO) permet l'évaluation des charges de pollution dissoute entrant sur une station d'épuration. Elle permet également de détecter des apports imprévus de pollution industrielle et de contrôler l'efficacité d'un traitement. Ce type de mesure est cependant peu utilisé du fait de sa difficulté de mise en œuvre

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2. PRINCIPES DE MESURE DES PARAMÈTRES USUELS

1.2.1. Les mesures de débit

Elles diffèrent selon que l'écoulement du liquide s'effectue à l'air libre ou dans une tuyauterie.

Dans le premier cas, on parle de mesure en canal ouvert dont le principe consiste à utiliser un déversoir, un seuil, un rétrécissement latéral du canal en forme de venturi, etc., et à mesurer le niveau de la surface libre par bulle à bulle ou ultrasons. Un préleveur d'échantillons est facilement associé à ce type d'appareil.

Les mesures en tuyauterie sont réalisées selon des principes variés, suivant le type de fluide à mesurer et selon la gamme de débit

Les débitmètres à turbine sont très utilisés pour les petits débits d'eau propre surtout s'il s'agit de comptage de volume.

Les dispositifs déprimogènes utilisés pour les liquides et les gaz consistent à créer un étranglement de la tuyauterie par un diaphragme calibré ou par un venturi; la valeur du débit est obtenue par mesure d'une différence de pression avec une loi de conversion appropriée.

Les débitmètres électromagnétiques sont utilisés pour mesurer le débit de liquides très chargés de matières en suspension ou lorsque l'on recherche une bonne précision dans une large plage de débits. Leur principe de fonctionnement est décrit ci-après.

L'eau qui s'écoule dans un tube isolant, est soumise à un champ magnétique d'intensité constante connue perpendiculaire à l'axe d'écoulement Elle se comporte comme un conducteur électrique se déplaçant dans un champ magnétique. Une force électromotrice prend naissance dans l'eau et il apparaît, entre deux électrodes disposées perpendiculairement au champ magnétique et baignant dans l'eau, une différence de potentiel U qui s'exprime par la formule: U = k.D.V.H. dans laquelle D, V et H sont respectivement le diamètre intérieur du tube isolant, la vitesse de l'eau et la valeur du champ magnétique et k est une constante.

L'avantage de ce débitmètre est aussi de ne créer aucune perte de charge; la différence de potentiel recueillie aux bornes des électrodes étant proportionnelle à la vitesse du fluide, l'indication du débit est linéaire et ne nécessite pas d'appareillage complémentaire. Le coût élevé de ce capteur pour de gros diamètres limite son emploi à 1000 $m^3.h^{-1}$ environ.

Les débitmètres à ultrasons dits "à temps de transit", sont basés sur le principe suivant: si deux sondes (émettrice et réceptrice) à ultrasons sont placées au sein d'un liquide en mouvement de telle façon que chacune d'elles reçoive les signaux émis par la sonde opposée, on observe une différence de temps de propagation suivant que l'onde acoustique se propage d'amont en aval ou d'aval en amont (composition des vitesses).

En appelant (figure 730 a):

v la vitesse d'écoulement,

d la distance entre sondes,

c la célérité du son dans le milieu,

θ l'angle entre le vecteur vitesse et la direction des sondes, la différence de temps de parcours s'écrit:

$$\Delta T = \frac{2\, v d \cos\theta}{c^2}$$

Cet appareil donne également une indication de débit linéaire et peut mesurer

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

des débits de liquides clairs sans bulles gazeuses, dans les gammes de gros débits.

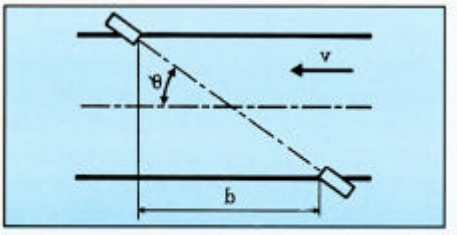
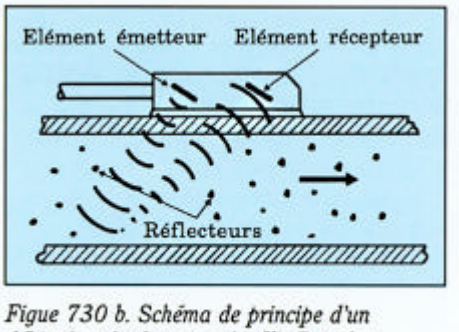


Figure 730 a. Schéma de principe d'un débitmètre à ultrasons (à temps de transit).

Les débitmètres à ultrasons à effet Doppler (figure 73 0 b) utilisent eux aussi une émission d'ultrasons mais la sonde de réception est située à côté de la sonde d'émission (ou dans le même boîtier),

pour capter l'onde réfléchie par les particules en suspension ou les bulles d'air. La vitesse d'écoulement du liquide est mesurée en comparant la variation de fréquence de l'onde réfléchie par rapport à l'onde émise: la variation de fréquence est proportionnelle à la vitesse moyenne du fluide dans la zone de réflexion des ondes ultrasonores.



Figue 730 b. Schéma de principe d'un débitmètre à ultrasons, à effet Doppler.

Les débitmètres à effet vortex (figure 731) sont basés sur le principe de la formation de tourbillons à l'aval d'un obsta

cle rencontré par un fluide. Ils sont généralement constitués d'une manchette traversée par un barreau de forme et dimension adéquates qui génère dans son sillage des tourbillons alternativement sur l'un et l'autre côté de l'obstacle. La fréquence à laquelle sont émis ces tourbillons, (mesurée à l'aide d'un capteur sensible aux variations oscillatoires de pression ou de vitesse) est proportionnelle à la vitesse de l'écoulement. Les débitmètres à effet vortex sont utilisés pour l'eau pure et les gaz.

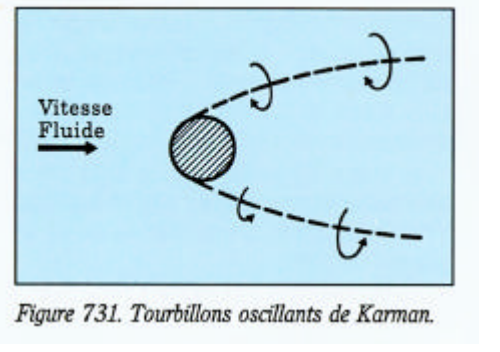


Figure 731. Tourbillons oscillants de Karman.

1.2.2. Les mesures de niveaux liquides

Elles sont réalisées par un grand nombre de systèmes dont quelques uns sont décrits ci-après.

Le plus ancien utilise un flotteur relié à un contrepoids par un câble dont on mesure le déplacement.

Les systèmes bulle à bulle (figure 732) permettent la mesure de niveaux situés à la pression atmosphérique.

Dans ces appareils le débit d'air est réglé par un robinet R de telle sorte qu'il s'échappe par bulles. La pression de l'air donnée par le manomètre est égale à la hauteur H de liquide au-dessus du débouché du tuyau, les pertes de charge étant négligeables.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

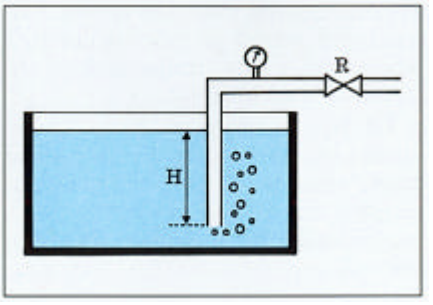


Figure 732. Principe d'une mesure de niveau liquide par système bulle à bulle.

Dans les systèmes à membrane, on utilise la propriété d'une membrane de se déformer proportionnellement à la charge à laquelle elle est soumise. Les déformations de cette membrane peuvent être mesurées électriquement Le signal électrique recueilli est proportionnel à la force agissant sur la membrane.

Les systèmes capacitifs (figure 733) ne comportent aucune pièce mécanique en mouvement. Dans un récipient, deux électrodes, dont l'une est revêtue de matière isolante, constituent un condensateur généralement alimenté à moyenne fréquence. Toute variation de la hauteur de liquide entraîne une modification de la capacité du condensateur et par conséquent de son impédance.

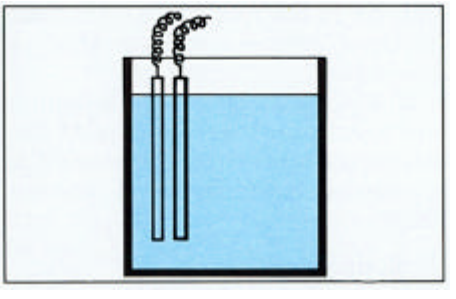


Figure 733. Mesure de niveau par système capacitif

Le dispositif de mesure de niveau par **ultrasons** ne comporte aucune pièce en contact avec le produit; il est donc particulièrement intéressant lorsque ce dernier est corrosif ou peut encrasser un autre type de capteur. Il fonctionne schématiquement de la façon suivante (figure 734)

Un signal ultrasonique, émis périodiquement par un émetteur-récepteur, est réfléchi par la surface libre du produit dont on veut mesurer le niveau. Le temps qui s'écoule entre l'émission du signal et la réception de l'écho est proportionnel à la distance de l'émetteur à la surface du produit dont on déduit ainsi le niveau. Ce capteur est utilisé pour des liquides et certains pulvérulents.

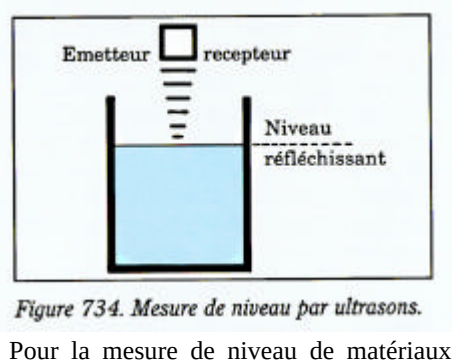


Figure 734. Mesure de niveau par ultrasons.

Pour la mesure de niveau de matériaux pulvérulents, on peut faire appel à des détecteurs électromécaniques palpant la surface périodiquement.

1.2.3. Les mesures de perte de charge
(filtres, lit fluidisé...)

Elles se ramènent à des mesures de pression.

On peut utiliser des capsules manométriques différentielles soumises aux pressions régnant de part et d'autre du lit granulaire, dont la différence représente la

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

perte de charge. Celle-ci est lue sur un manomètre à cadran ou transmise à distance.

1.2.4. La température

La température de l'eau est généralement mesurée à l'aide d'un thermomètre à résistance afin de pouvoir être transmise à distance. On utilise la croissance de la résistivité des métaux avec la température; le courant électrique traversant une telle résistance alimentée sous tension constante sera donc inversement proportionnel à la température du milieu environnant.

Dans les gammes de températures élevées (production de vapeur, four, etc.) on utilise des thermomètres à effet de thermocouple où l'on mesure la différence de potentiel entre deux éléments en métaux différents reliés entre eux à une extrémité.

1.3 PRINCIPES DE MESURE DES PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES

Dans les appareils utilisés pour la mesure des paramètres spécifiques de l'eau, les différentes méthodes d'analyse classiques sont mises en oeuvre de façon automatique, en particulier: la néphélométrie (mesure de turbidité), la mesure de résistivité (mesure de salinité), la potentiométrie (mesure de pH et de rH), l'ampérométrie (mesure de concentration en agent oxydant, chlore, ozone, brome), la photo colorimétrie et la titrimétrie (mesure de la concentration de certaines substances dissoutes dans l'eau).

On peut classer ces différents appareils en deux grandes catégories: celle des capteurs physiques et celle des analyseurs chimiques qui réalisent, préalablement à toute mesure, une ou plusieurs réactions chimiques.

1.3.1. Capteurs physiques

A. Turbidimètres

La valeur de la turbidité est obtenue par mesure de la quantité de lumière diffusée par l'effet TYNDALL dû à la présence de particules dans l'eau.

Un faisceau lumineux vient toucher la surface sous une incidence telle que ni lui-même ni le faisceau réfléchi ne peuvent impressionner une cellule photorésistante placée sensiblement perpendiculairement au faisceau incident. Par contre, la lumière diffusée par les particules en suspension vient modifier d'autant plus l'éclairement de la cellule que leur nombre est élevé, ce qui permet d'obtenir la mesure de la turbidité de cette eau (figure 735).

Selon l'appareil utilisé, les gammes de mesure s'étendent de 0 à 5 000 unités néphélométriques de turbidité (NTU).

B. Mesure de concentration en MES

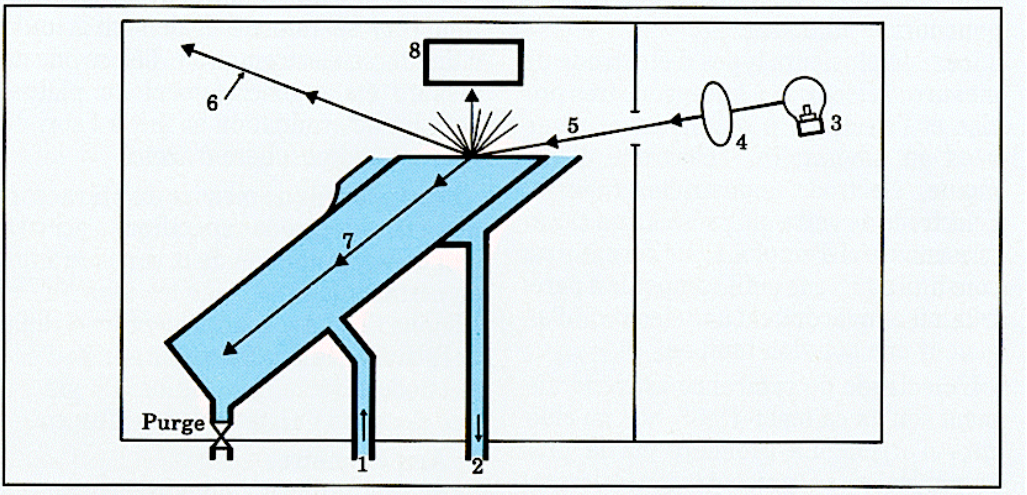
Ces capteurs fonctionnent sur le principe de l'absorption d'un faisceau lumineux, dans le spectre visible ou infrarouge, ou d'une onde ultrasonore.

Des dispositifs à faisceaux multiples sont parfois utilisés pour atténuer les effets d'encrassement de sonde, permettant ainsi de pouvoir mesurer, avec certains appareils, jusqu'à des concentrations de boue activée.

C. Niveau de voile de boue

Une sonde de mesure de concentration de MES, suspendue à un câble et plongeant dans un décanteur ou clarificateur,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Entrée d'eau.
2 - Sortie d'eau.
3 - Source lumineuse.
4 - Lentille.
5 - Lumière incidente.
6 - Lumière réfléchie.
7 - Lumière réfractée.
8 - Cellule photoélectrique.

Figure 735. Principe de turbidimètre.

peut détecter un niveau de voile de boue. Un dispositif approprié permet de monter ou de descendre la sonde, pour suivre les évolutions de celui-ci (défini par le dépassement d'un seuil de concentration).

D. Résistivimètres - Conductivimètres

Ce n'est que dans le cas d'eaux déminéralisées ne contenant généralement à l'état ionisé que des sels de sodium, qu'il est vraiment possible de lier résistivité et salinité. De la même façon, on peut contrôler automatiquement la concentration d'une solution acide ou basique de régénération d'un échangeur d'ions.

Le principe mis en oeuvre est simple puisqu'il consiste à mesurer (intensité du courant électrique recueilli aux bornes de deux électrodes de géométrie connue, plongées dans l'eau et soumises à une différence de potentiel alternative, dont la fréquence doit être d'autant plus élevée que la concentration en acides, sels ou bases dissous est grande pour éviter les phénomènes de polarisation.

La résistivité d'une eau étant fonction du degré de dissociation des molécules dissoutes, 1a plupart des appareils comporte une compensation automatique de température pour ramener la valeur de la mesure à une température de référence donnée.

E. Les pH-mètres

Industriellement, la mesure du pH se fait toujours par potentiométrie à l'aide de deux électrodes: une électrode de référence, une électrode de mesure; l'électrode de référence est plongée dans une solution de concentration constante en ions hydrogène. Une cloison laissant passer le courant électrique sépare la solution de référence de celle dont on veut mesurer le pH et dans laquelle est plongée l'électrode de mesure. Une tension, fonction linéaire de la concentration en ions hydrogène de la solution, apparaît alors aux bornes des électrodes. Il suffit donc de relier ces bornes à un voltmètre pour connaître la valeur du pH.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

En pratique, les électrodes sont réunies pour former une sonde.

Il existe plusieurs types d'électrode de mesure: l'électrode à hydrogène très précise et l'électrode à quinhydrone réservées au laboratoire; l'électrode d'antimoine, électrode industrielle robuste; l'électrode de verre qui présente un caractère universel d'emploi. Cette dernière est constituée par une petite ampoule à paroi très mince qui contient une électrode d'argent et une solution tampon.

L'électrode de référence est généralement soit au calomel (HgCI), soit au chlorure d'argent. La première est la plus employée et se présente généralement sous la forme d'un tube rempli d'une solution saturée de KCl dans lequel est immergée une certaine quantité de mercure et de calomel, la diffusion de la solution de chlorure de potassium dans le liquide se faisant lentement au travers d'une cloison poreuse. Il existe plusieurs électrodes au chlorure d'argent, variant par la concentration de l'électrolyte (KCl).

La détermination du pH consiste donc à mesurer la force électromotrice d'une pile dont la résistance de l'une des électrodes (verre) est très élevée (plusieurs mégohms), cette force électromotrice étant de quelques millivolts et devant être mesurée sans passage de courant pour éviter tout phénomène de polarisation.

Les électrodes peuvent être du type à immersion ou à circulation, et comporter ou non un dispositif de nettoyage. L'électrode de verre ayant une résistance variant avec la température, les pHmètres qui l'utilisent sont généralement compensés.

Dans les applications difficiles lorsqu'il y a un risque de contamination de la cellule de référence parle milieu à mesurer ou pour une mesure sous pression, l'électrolyte est remplacée par une solution gélifiée.

La mesure du potentiel d'oxydoréduction (EH) se ramène également à celle d'une force électromotrice, l'électrode de mesure étant généralement en platine poli. La détermination se fait à l'abri de l'air sous atmosphère d'azote.

Les appareils de mesure du pH raccordés à des électrodes spécifiques permettent la détermination de la concentration en certains ions tels que les ions Ne et les ions Cl-. La mesure potentiométrique de l'activité des ions Ne se fait à l'aide d'une électrode de verre, celle des ions Cl- grâce à une électrode d'argent-chlorure d'argent

F. Ampèromètres

Ils sont utilisés industriellement en traitement des eaux pour la mesure en continu de la concentration en agents oxydants et mettent en oeuvre une méthode simplifiée d'analyse par ampérométrie. La cellule de mesure, qui est alimentée à débit constant en eau à analyser, comporte une cathode inattaquable mais polarisable, par exemple en platine et une anode qui peut être en cuivre, en cadmium, en argent, etc. En l'absence d'agent oxydant, la pile ainsi formée est polarisée et n'est traversée que par un courant très faible; sa dépolarisation et par conséquent l'intensité du courant qu'elle débite sont sensiblement proportionnelles à la concentration de l'agent oxydant qui vient se réduire à la cathode. On mesure ainsi les concentrations en chlore, brome, ozone, oxygène d'une eau. Dans le cas où le corps dont on recherche la concentration est susceptible de se combiner pour donner des composés tels que les chloramines pour le chlore, un ajustement automatique du pH est nécessaire si l'on veut connaître la somme du chlore libre et du chlore combiné. Les cellules de mesure comportent généralement un dispositif d'agitation de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

l'eau afin de favoriser la diffusion du dépolarisant vers la cathode et de nettoyer en continu les électrodes. Ce dispositif est constitué soit par des billes de verre qui, entraînées par le courant d'eau, viennent frapper les électrodes, soit par une brosse entraînée dans un mouvement de rotation par un moteur.

L'inconvénient de ces appareils réside dans le fait qu'ils mesurent la somme des agents oxydants et qu'ils ne peuvent être vraiment utilisés que dans le cas où un seul corps se trouve en solution à concentration variable. L'effet d'autres corps, éventuellement présents à concentration constante, peut être annulé par action sur le zéro de l'appareil.

A la classe des ampéromètres peuvent être rattachés les mesureurs de concentration d'oxygène par polarographie. La sonde de ces appareils comporte une cathode d'or et une anode d'argent immergées dans un électrolyte constitué par un gel de chlorure de potassium isolé du liquide à contrôler par une membrane en téflon, et qui sont soumises à une différence de potentiel de valeur constante. L'oxygène dissous diffuse à travers la membrane pour donner une réaction d'oxydo-réduction.

$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

qui fait suite à la réaction d'électrolytes:

$4Ag + 4C1^- \rightarrow 4AgCl^- + 4e^-$

L'intensité du courant est proportionnelle à la pression partielle d'oxygène dans la phase liquide.

1.3.2. Analyseurs spécifiques

Les photocolorimètres automatiques réalisent automatiquement les opérations préliminaires à l'analyse quantitative par photocolorimétrie de certains éléments à l'état dissous dans l'eau. Ces opérations consistent à transformer, à l'aide de réactifs, l'élément dont on recherche la concentration en un composé coloré, le plus souvent complexe, dont l'intensité de la coloration est d'autant plus importante que la concentration est grande. La mesure consiste à quantifier l'énergie lumineuse transmise au travers de la solution et dont la valeur est, d'autant plus faible que la, concentration est élevée suivant la loi exponentielle de LAMBERT-BEER Ainsi, sont actuellement mesurées de façon entièrement automatique les concentrations en **silice, phosphate, phénols, détergents, fer, hydrazine,** la dureté d'une eau douce jusqu'à un maximum d'un dixième de milliéquivalent par litre, etc.

Les titrimètres automatiques effectuent la mesure par titration d'un paramètre chimique. A cet effet, suivant un cycle d'analyse prédéterminé, une solution titrée d'un réactif adéquat est ajoutée progressivement dans un échantillon d'eau de volume figé. Ce réactif réagit avec l'élément dont on recherche la concentration pour former un composé connu. La fin de la réaction est déterminée par l'obtention d'une certaine valeur de pH détectée, soit à l'aide d'un pHmètre classique, soit par virage de la soloration de l'eau due à la présence d'un indicateur spécifique préalablement introduit

Au chapitre 5 (§ 3.2) sont présentées les diverses méthodes d'analyse de laboratoire.

1.4. CAPTEURS TOUT OU RIEN

Les mesures, dont les principes viennent d'être décrits, sont souvent comparées à une valeur de référence, appelée seuil, de telle manière que, si la mesure dépasse un seuil, le système avertisse l'opérateur ou réagisse automatiquement sur un organe de réglage. Dans ce cas, l'in-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

formation utile n'est pas une valeur continue mais une information TOR ou binaire: le seuil est dépassé ou pas.

D'autres capteurs ne délivrent que des informations TOR et sont très utilisés pour des signalisations, des alarmes et des automatismes.

Un pressostat détecte un seuil de pression et un thermostat un seuil de température.

La position extrême d'un mobile en déplacement, (pont racleur alternatif, rateau de dégrillage automatique ou obturateur de vanne), peut être détectée par un fin de course mécanique dans lequel un poussoir agit mécaniquement sur un contact électrique, ou bien par un **détecteur de proximité** électronique qui ouvre ou ferme un circuit électrique, en fonction de la présence d'un objet déterminé dans une zone sensible sans contact avec le capteur.

Pour détecter un niveau d'eau non déminéralisée, on utilise un **détecteur conductif** constitué d'une électrode placée à ce niveau. L'eau étant reliée à la masse, un courant s'établit entre l'eau et l'électrode lorsque celle-ci est noyée.

Pour des eaux résiduaires, on préfère généralement un interrupteur à flotteur dont le type le plus connu est constitué d'un contact à mercure basculant, enfermé dans un flotteur, suspendu au-dessus de la surface de l'eau par son câble de liaison.

Pour des produits pulvérulents, des liquides chargés ou colmatants, on utilise des détecteurs vibrants dont la fréquence de vibration d'une lame varie selon qu'elle est immergée ou non.

Dans le cas d'enceintes fermées sous pression et sous forte température, des détecteurs à rayon gamma sont utilisés.

Il faut signaler enfin, certains capteurs qui délivrent des impulsions dont la fréquence permet de mesurer une grandeur. C'est le cas, par exemple, des débitmètres à hélice, de contrôleurs de rotation, de compteurs de particules, etc.

1.5. STATIONS D'ALERTE

L'équipement des stations d'alerte et d'analyse automatique dépend de leurs fonctions qui sont généralement classées en deux catégories

- le suivi analytique de la qualité des eaux de surface qui est réalisé au moyen d'appareils de détermination de paramètres simples (pH, température...) et d'appareils de mesure de paramètres organiques globaux (COT, absorption W...),
- l'alerte pollution, sur les rivières utilisées pour l'alimentation en eau potable d'agglomérations urbaines industrialisées, qui est assurée par des dispositifs de mesure de paramètres spécifiques (ammonium, hydrocarbures, métaux lourds...) et des appareils de test global de toxicité (test poisson) couplés à des préleveurs automatiques.

La détermination des paramètres mesurés fait suite à des études de risques de pollution potentiels. Cependant, la gamme d'appareils sur le marché ne permet pas de couvrir ou de détecter toutes les pollutions accidentelles possibles.

La préparation des échantillons à analyser doit faire l'objet d'une attention particulière nécessitant, pour certaines mesures, un prétraitement tel que décantation, hydrocyclonage ou une filtration sans contaminer l'échantillon ni éliminer l'élément à doser (figure 736).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

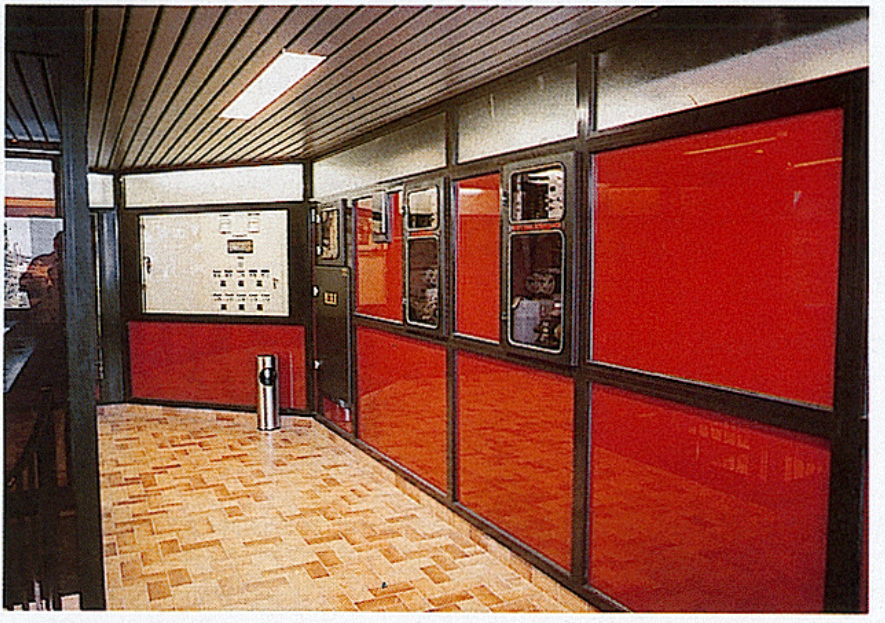
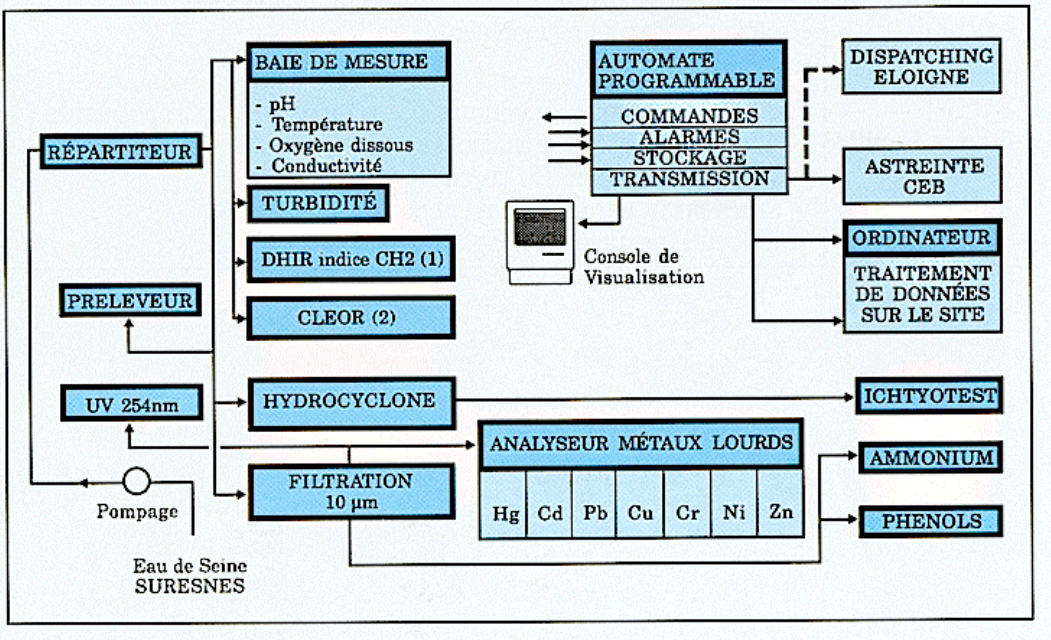


Figure 736a. View of CEB warning station at the Mont-Valérien plant near Paris, France.

Figure 736 a. Installation du MONT- VALÉRIEN (Hauts-de-Seine) pour la station d'alerte C.E.B.



1 - DHIR - détection hydrocarbures par infrarouges.
2 - CLEOR - concentration liquide et extraction organique.

Figure 736 b. Schéma fonctionnel de la station d'alerte et d'analyse automatique du MONT-VALÉRIEN (CEB).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'exploitation des signaux de mesure est réalisée selon deux modes de traitement:

- transmission en temps réel des alertes pollution au personnel de surveillance et enclenchement d'un prélèvement d'échantillon en vue d'une confirmation par analyse manuelle de laboratoire; les défaillances du matériel sont également transmises au personnel de surveillance,
- - stockage des valeurs mesurées en vue d'un traitement informatique en temps différé.

La maintenance et l'exploitation requierent un personnel très qualifié dans diverses disciplines et représentent un coût annuel de l'ordre de 10 à 25 % de la valeur de l'investissement initial, suivant la complexité des moyens d'analyse.

Les tableaux 84 et 84 bis résument les différentes finalités des mesures effectuées dans une station d'alerte

Tableau 84. Finalités des prélèvements automatiques pour analyse laboratoire.

Paramètres analyses	**Alerte pollution**	**Suivi de qualité du milieu naturel**
Préleveurs rejeteurs en continu	Échantillonnage perpétuel Analyse en laboratoire Prélèvement sur dépassement de seuil	- Campagne d'analyses en laboratoire
Extracteur liquide.- liquide	Produits organiques inconnus: - Analyse des traces organiques (mg, µg, ng.l^{-1}) en CG rapide - Prélèvement sur dépassement de seuil, pesticides, HPA...	- Études des micropolluants organiques

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 84 bis - Finalité des analyses automatiques dans une station d'alerte.

Paramètres analyses	Alerte pollution	Suivi de qualité du milieu naturel
pH		- Pollution rejet industriel - Forte photosynthèse
Température		- Variations saisonnières - Activité piscicole et biologique en général
O_2	Pollution organique importante	- Rejets organiques - Activité photosynthèse - Pluviosité
Conductivité	Pollution minérale importante	- Variations saisonnières - Pollution rejet industriel
Turbidité (90°, 180°)	Déversement de réseau pluvial	- Variations saisonnières et régimes hydrologiques
COT	Fortes pollutions organiques d'origines très diverses	- Variations activité fluviale - Variations saisonnières
NH_4	Pollution spécifique industries et ERU	- Qualité de l'eau - Activité biologique - Pollutions chroniques
$N0_3$	Pollution spécifique et agricole	- Transformation de l'azote ammoniacal - Pollution d'origine agricole
UV 254 nm	Pollution dérivés benzéniques	- Indication semi-qualitative des MO
Métaux lourds	Pollution spécifique (traitement de surface, chimie fine)	- Rejets polluants chroniques industriels - Lessivage des infrastructures routières
Hydrocarbures (Indice CH_2)	Déversement d'hydrocarbures Interférence détergents à forte concentration	- Pollution chronique
Test poisson (par extension tests biolog.)	Eau toxique pour les poissons utilisés	
Débit rivière (vitesse,hauteur)	Temps de transfert des nappes de pollution	- Corrélation avec paramètres d'analyses

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.6. INSTRUMENTATION

1.6.1. Définitions

On appelle boucle de mesure ou chaîne de mesure, l'ensemble des instruments connectés entre eux et relatifs à la mesure et au traitement d'un paramètre.

L'élément primaire de cette boucle est le capteur qui convertit directement ou indirectement le paramètre mesuré en signal électrique. Le capteur est dit actif lorsqu'il génère un signal électrique fonction du paramètre mesuré. Ce signal, de très faible puissance, est dit de bas niveau et doit être amplifié pour pouvoir être transmis à distance.

Le capteur passif travaille par variation d'impédance en fonction du paramètre mesuré et doit être alimenté par une source extérieure.

Sous l'action du capteur, le **transmetteur** élabore un signal de "haut niveau" qui est généralement caractérisé par une tension (par exemple, 0-10 volts) ou un courant (par exemple, 4-20 mA).

Le premier chiffre désigne le bas de l'échelle, c'est-à-dire la valeur du signal lorsque la valeur du paramètre mesuré (la mesure) est minimale, tandis que le second chiffre désigne le haut de l'échelle, c'est-à-dire la valeur du signal lorsque la valeur "mesure" est maximale.

1.6.2. Loi de conversion

La loi de conversion caractérise la relation qui relie la valeur de la mesure à la valeur du signal (figure 732).

Cette loi est linéaire lorsque la relation est de la forme:

$$S = S_o + \frac{S_m - S_o}{x_m - x_o}(x - x_o)$$

où:

S est la valeur du signal, est la valeur de la mesure,

X est la valeur du signal bas de l'échelle,

S_0 est la valeur de la mesure pour un signal bas de l'échelle,

X_0 est la valeur du signal haut d'échelle,

S_m est la valeur de la mesure pour un signal haut de l'échelle,

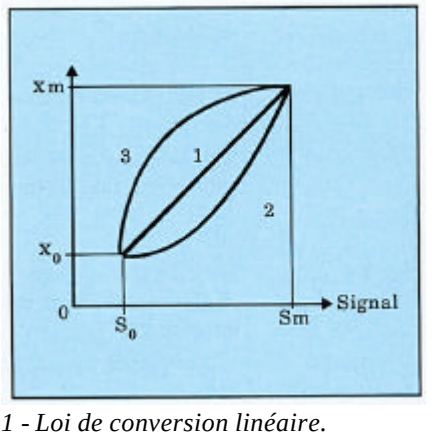
$X_m - X_0$ est l'étendue de l'échelle de mesure,

S_m-S_o est l'étendue de l'échelle du signal.

Une différence de valeur de mesure se traduit par une différence proportionnelle de valeur du signal.

La loi est **quadratique,** lorsque $S - S_0$ est proportionnel au carré de $X - X_0$.

La loi est logarithmique lorsque $S - S_0$ est proportionnel au logarithme de $X - X_0$.



1 - Loi de conversion linéaire.
2 - Loi de conversion quadratique.
3 - Loi de conversion logarithmique
Figure 737. Exemples de lois de conversion

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le signal ainsi conditionné est transmis à des récepteurs qui ont pour fonctions:

- de présenter l'information sous forme intelligible (indicateur à aiguille ou digital, enregistreur, centrale d'acquisition de données, ordinateur, etc.),
- de traiter cette information en vue de réagir automatiquement sur le procédé (régulateur, automate programmable, etc.).

1.6.3. Facteurs de qualité

Pour que le fonctionnement de l'ensemble d'une boucle de mesure soit correct, il est essentiel de s'assurer de la compatibilité de chacun des instruments de la boucle, de vérifier les adaptations d'impédance, l'isolement galvanique par rapport aux autres boucles de mesure, etc.

L'information ainsi délivrée, surtout si elle est utilisée dans une régulation automatique ou dans un bilan d'exploitation, doit être le plus possible représentative de la valeur vraie du paramètre mesuré.

De nombreux facteurs conditionnent l'écart entre la valeur du paramètre mesuré et l'information délivrée. En particulier

a - la précision de chaque instrument de la boucle caractérisée par la classe de précision. Celle-ci, exprimée en pour cent, est le quotient de l'incertitude de la valeur obtenue, par l'étendue de mesure et pour des conditions de service données.

b -les erreurs systématiques qui peuvent être dues à un étalonnage incorrect ou trop peu fréquent, à des **conditions d'installation** inadaptées, etc.

c - les erreurs accidentelles pouvant être dues à des signaux parasites, à des absences de corrections de température, pression, situation, humidité, etc.

d - la fiabilité des appareils: le bon fonctionnement de ceux-ci peut être mis en cause par des pannes, des bouchages de tuyauterie de prélèvement, un entretien insuffisant, etc.

e -le bon choix du paramètre mesuré pour l'utilisation qui en est faite et dont dépend aussi le degré de confiance dans l'information délivrée. Par exemple, estimer la demande en oxygène d'une eau par une mesure nécessitant la filtration préalable de celle-ci ne convient pas si une partie importante de la pollution organique est liée aux MES.

En conclusion, pour tirer pleinement parti des avantages des capteurs de mesure et de l'instrumentation associée, il est indispensable d'accepter certaines contraintes telles que nettoyages de sondes, étalonnages réguliers, préparation de réactifs pour les analyseurs, dépannages, etc.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.7. ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Des évolutions significatives sont à prévoir avec l'apparition de capteurs intelligents, de microcapteurs et l'utilisation de modèles mathématiques.

1.7.1. Capteurs intelligents

Le développement de la micro-électronique programmée conduit à de nouveaux types de capteurs numériques interactifs, dénommés intelligents, dont la particularité est d'être dotés d'une capacité de calcul et de traitement interne qui leur permet des performances métrologiques et fonctionnelles accrues par rapport à celles des capteurs analogiques classiques.

Un capteur intelligent apporte généralement

- une meilleure précision grâce à des possibilités de correction automatique et à une grande étendue de mesure,
- une meilleure sûreté de fonctionnement grâce à des autodiagnostics,
- une intégration dans l'ensemble du système d'automatisme grâce à des pos**sibilités de communication.**

Le développement de ce type de capteur est freiné par des contraintes économiques mais il doit trouver son essor parallèlement au développement des réseaux de communication (page 1161) et notamment avec les réseaux de terrain.

1.7.2. Microcapteurs

Une autre évolution réside dans l'introduction de la micro-électronique au niveau de la sonde de mesure elle-même pour les analyses chimiques et biochimiques de laboratoire. La technologie utilisée est celle du transistor à effet de champ dans laquelle une puce de silicium est en contact avec le liquide à analyser à travers une membrane; c'est la nature de cette membrane sensible qui permet de fixer la sélectivité du capteur.

L'intérêt essentiel des microcapteurs réside dans leur miniaturisation, la facilité d'intégration du traitement du signal et leur possibilité de fabrication, à très faible coût en grande série, autorisant le principe de la sonde jetable.

1.7.3. Modélisations

Quels que soient les progrès des capteurs, il reste toujours des mesures difficiles à obtenir automatiquement en continu de manière fiable, et qui, pourtant, rendraient d'énormes services pour le pilotage automatique de certains procédés de traitement.

Des perspectives d'avenir s'ouvrent avec l'utilisation d'outils informatiques. Il s'agit, dans un premier temps, de collecter un grand nombre de données de mesures automatiques et manuelles puis, par application d'outils mathématiques de calcul statistique, de déterminer les corrélations les plus significatives entre les paramètres disponibles. On peut arriver ainsi à calculer rapidement une valeur probable d'un paramètre à partir d'autres mesures plus simples ou plus rapides. Cependant, les modèles calculés, parfois purement stochastiques, sont spécifiques à l'installation étudiée et leur valeur dépend de celle des données initiales (p. 1120).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. AUTOMATISATION

2.1. GÉNÉRALITÉS

2.1.1. Objectifs

L'automatisation d'une usine de traitement d'eau est une nécessité. Encore faut-il ne pas céder à la tentation de suivre une mode, mais bien analyser les objectifs de l'automatisation et en particulier pourquoi et pour qui automatiser?

a - Amélioration des conditions d'exploitation

La première fonction d'une automatisation est de supprimer des tâches répétitives et pénibles pour l'opérateur, par exemple en installant des actionneurs sur des vannes importantes ou manœuvrables fréquemment, en motorisant une grille, etc.

Plus récemment, l'automatisation et la supervision par ordinateur ont conduit à une augmentation du confort en permettant une meilleur maîtrise, même à distance, d'un grand nombre d'informations présentées agréablement et en simplifiant les tâches d'exploitation, de surveillance, de maintenance et de gestion.

b - Amélioration des performances de l'installation

En premier lieu, on peut viser à améliorer la qualité du traitement en mettant en oeuvre des mesures et des régulations complémentaires internes au procédé, comme, par exemple, le dosage de réactifs, le niveau d'oxygénation, le contrôle de température de réacteurs, etc.

L'automatisation des procédés permet aussi de s'affranchir de certaines faiblesses humaines et d'accroître la fiabilité, comme par exemple, laver automatiquement des filtres indépendamment des intempéries. Mais un objectif important est d'améliorer la sûreté de fonctionne**ment** d'une installation en prenant en compte des critères de habilité, en étudiant les marches dégradées, c'est-à-dire en prévoyant la manière dont l'installation peut continuer à fonctionner en cas de panne d'un organe, en assurant la mise en œuvre automatique d'équipements de secours, en organisant une aide au dépannage, etc.

L'automatisation, couplée à un stockage d'informations, permet d'envisager des études statistiques des données recueillies ouvrant la voie à des études d'optimisation de traitement

c - Accroissement de productivité

L'automatisation peut viser à augmenter la productivité par diminution des coûts d'exploitation. On peut ainsi optimiser les coûts d'énergie en fonction des tarifs horaires ainsi que ceux des matières consommables.

La diminution de personnel posté et l'organisation d'une maintenance préventive permettent également une réduction des coûts.

d - Aide à la surveillance

Elle comprend l'installation de capteurs, la détection d'alarmes, la mise en place de moyens d'enregistrement de données et de transmission à distance, qui peut aller jusqu'à la supervision par ordinateur, etc.

L'automatisation n'est pas un objectif en soi. Le niveau de complexité de l'installation doit être adapté aux compétences disponibles localement et aux objectifs. L'automatisme doit être considéré comme une aide et non une contrainte.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Une des conséquences d'une automatisation fiable peut être une "perte de mémoire" de l'exploitant qui n'est plus en contact assez direct avec le procédé. Cependant, ses avantages sont évidents si l'installation est conçue et mise en route par un spécialiste du traitement bénéficiant d'une longue expérience acquise dans des conditions locales et sur des procédés très différents.

2.1.2. Structure d'un système automatisé

La partie commande fournit des ordres au procédé composé de pompes, vannes, etc. (partie opérative), grâce à des **actionneurs** et reçoit des informations sur l'état du procédé grâce à des capteurs (figure 738).

L'ensemble procédé, actionneurs, capteurs et partie commande constitue le système automatisé.

En plus du dialogue ordres-comptes rendus entre les capteurs, les actionneurs et la partie commande, cette dernière échange des informations avec l'opérateur dont elle reçoit des consignes et à qui elle fournit des comptes rendus (voyants lumineux par exemple).

Un système automatique est un système bouclé: en effet, la partie commande fixe l'état des actionneurs qui, à leur tour, modifient le procédé, ce qui entraîne une modification de l'état des capteurs qui est transmise à la partie commande, qui elle-même en tient compte pour commander les actionneurs, etc.

Par convention, on a choisi d'étudier le système automatisé vu **du côté de la partie commande.** Cette convention fait que:

- les informations provenant des capteurs et de l'opérateur sont les entrées du système,
- les ordres fournis aux actionneurs ainsi que les comptes rendus fournis à l'opérateur sont les sorties du système.

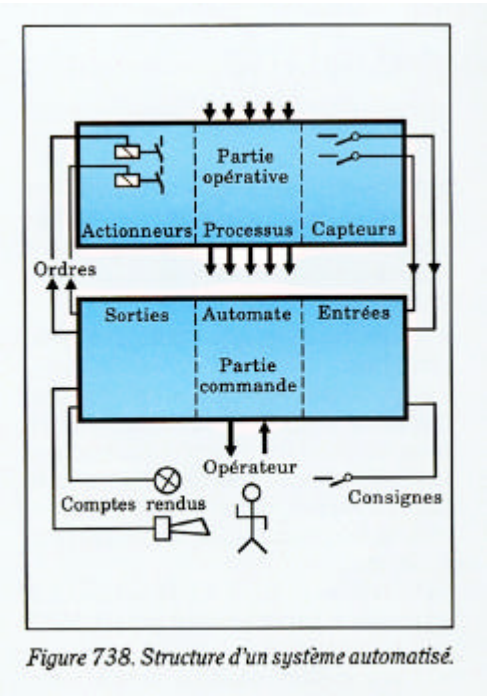


Figure 738. Structure d'un système automatisé.

On classe généralement les automatismes en deux grandes familles suivant les types d'entrées-sorties (abréviations E/S en français).

a - Les automatismes logiques pour lesquels les E/S sont de type tout nu rien (TOR), c'est-à-dire que chacune d'elles ne peut prendre que 2 états, par exemple ouvert/non ouvert, vrai/faux, etc.

b - Les automatismes continus pour lesquels les E/S représentent des valeurs analogiques ou numériques.

Les automatismes combinatoires et séquentiels se situent dans la catégorie des automatismes logiques tandis que les régulations se situent dans la catégorie des automatismes continus.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2. RÉGULATION

2.2.1. Principes généraux

La régulation automatique consiste en général à établir, à l'aide d'un appareil appelé régulateur, une corrélation entre deux grandeurs physiques x et y, dites couplées si, à une action de x sur y correspond une réaction négative de y sur x tendant à annuler l'effet de cette action. x est appelé grandeur réglée et y grandeur de l'organe réglant. Si à x est imposée une valeur x_0 dite valeur de consigne, tout écart entre x et x_0 conduit à une action sur y telle que la variation de y a tendance à annuler cet écart. On réalise ainsi une chaîne bouclée qui, pour toute perturbation tendant à modifier la valeur de x, ramènera automatiquement x à sa valeur de consigne x_0 (figure 739).

Un ensemble de régulation automatique comprend

- un organe de mesure de la grandeur réglée (capteur),
- un régulateur qui compare la valeur x de cette grandeur à sa valeur de consigne x_0 et élabore l'action sur la grandeur de réglage y,
- un organe de modification de la grandeur de réglage ou organe réglant (actionneur).

Généralement de façon à ne pas perturber la mesure, le régulateur reçoit d'une source extérieure l'énergie nécessaire à réaliser le couplage des deux grandeurs, cette énergie étant modulée par le signal provenant de l'organe de mesure. Il en résulte que, si la valeur de la réaction de la grandeur de réglage sur la grandeur réglée est exagérée, il peut se produire une instabilité du système due à un phénomène d'oscillations entretenues appelé pompage.

Si l'état du système peut être défini par une fonction dans laquelle n'apparaît pas le paramètre temps, on dit que le régime est permanent.

Lorsqu'un des paramètres de la fonction prend une nouvelle valeur, la fonction ne prend pas immédiatement sa nouvelle valeur d'équilibre mais seulement après un certain délai, pendant lequel la valeur de cette fonction varie en fonction du temps suivant une courbe exponentielle ou suivant une sinusoïde amortie. Durant cette période, le régime est dit **transitoire (figure** 741).

2.2.2. Les régulations classiques

a - La régulation la plus simple est celle par tout ou rien (TOR). Appliqué par exemple à la régulation du niveau h dans un réservoir (grandeur réglée) d'où l'on

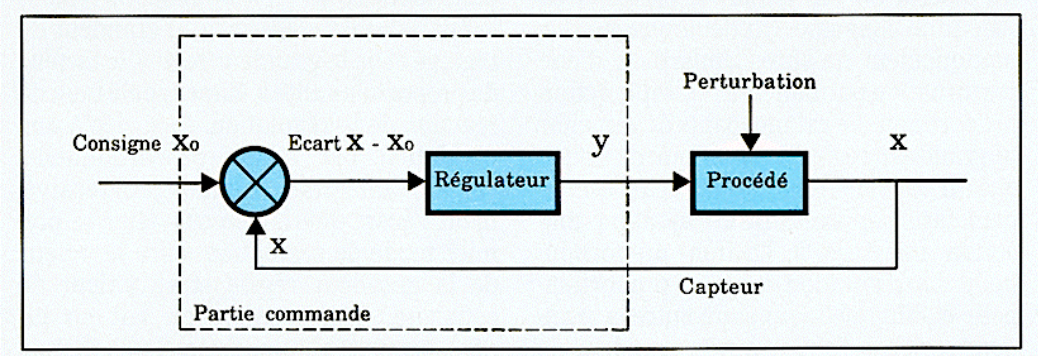


Figure 739. Boucle de régulation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

soutire un débit variable en fonction d'une consommation, ce mode de régulation comporte une vanne placée sur l'arrivée d'eau (figure 740) qui est fermée et interrompt donc le débit (grandeur de réglage) lorsque le niveau dépasse de $?h_1$, la valeur de consigne h_0 et ouverte quand, au contraire, ce niveau est inférieur de $?h_2$ à la valeur de consigne. Cette régulation très simple ne permet généralement pas l'obtention d'un niveau d'une stabilité suffisante, sauf si le réservoir présente un grand volume par rapport au débit qui le traverse ou si l'on peut accepter des manoeuvres très fréquentes de la vanne.

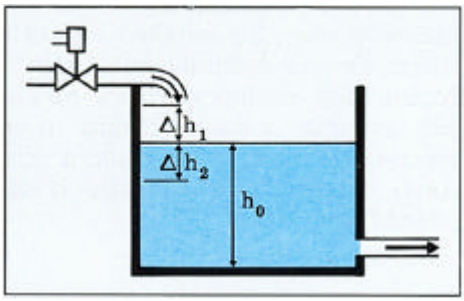


Figure 740. Régulation tout ou rien.

b - Le mode de régulation par **action proportionnelle** consiste à rendre l'intensité de l'action sur la grandeur de réglage proportionnelle à l'écart entre la valeur à un instant t de la grandeur réglée et sa valeur de consigne. On démontre mathématiquement qu'après apparition d'une perturbation permanente la simple action proportionnelle est incapable de ramener la grandeur réglée à sa valeur de consigne; il subsiste toujours un écart qui ne peut être supprimé qu'en ajoutant une action intégrale à l'action proportionnelle. La régulation à action proportionnelle établit une loi linéaire entre la grandeur réglée et l'action sur la grandeur de réglage. La projection de la droite caractéristique du régulateur sur l'axe des abscisses portant les valeurs de la grandeur réglée (les valeurs de la grandeur de réglage étant en ordonnées), est appelée **bande d'action proportionnelle.** Elle s'exprime généralement en pourcentage de l'échelle totale de mesure de l'appareil.

L'importance de cette bande se modifie en faisant varier le coefficient angulaire de la droite caractéristique du régulateur. L'écart entre la valeur de consigne fixée pour la grandeur réglée et celle prise après apparition d'une perturbation et action de la régulation est d'autant plus faible que la bande proportionnelle est faible, mais la réduction de cette bande à une valeur trop faible entraîne un phénomène de pompage et une instabilité de la régulation. On remédie à cet inconvénient en faisant intervenir dans la régulation une action intégrale.

c - Ce mode de régulation par **action intégrale** consiste à rendre l'intensité de l'action sur la grandeur de réglage proportionnelle à l'intégrale dans le temps des écarts entre la valeur de la grandeur réglée et sa valeur de consigne.

Ce mode de régulation peut s'exprimer sous la forme mathématique suivante:

$$\frac{dy}{dt} = -kx$$

dans laquelle y et x sont respectivement les variations relatives de la grandeur de réglage et de la grandeur réglée, le facteur de proportionnalité k étant appelé taux de réaction de la régulation. Associée à une régulation par action proportionnelle, l'action intégrale annule progressivement l'écart que laisse subsister le premier mode de régulation entre la valeur de la grandeur réglée et sa valeur de consigne. Elle consiste en fait en un déplacement automatique de la bande d'action proportionnelle. La régulation

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

par action proportionnelle et intégrale ramène donc progressivement la valeur de la grandeur réglée à sa valeur de consigne dans un temps d'autant plus court que le taux de réaction est grand. L'action proportionnelle ne faisant pas intervenir le facteur temps et l'action intégrale n'intervenant que progressivement, on conçoit qu'une régulation limitée à ces deux actions soit incapable d'apporter une correction à l'effet d'une perturbation rapide et de forte amplitude. Cette correction proportionnelle à la vitesse de la perturbation est réalisée automatiquement par la régulation par action dérivée, encore appelée régulation de tendance.

d - Le mode de régulation par action dérivée consiste à rendre l'intensité de l'action sur la grandeur de réglage proportionnelle à la dérivée par rapport au temps de l'écart entre la valeur instanta

née de la grandeur réglée et sa valeur de consigne. Il peut s'exprimer sous la forme mathématique suivante:

$$y = -k \frac{dx}{dt}$$

Cela revient donc en fait à réduire au moment de la perturbation la bande d'ac

tion proportionnelle, ou autrement dit à augmenter la sensibilité de la régulation, et à la ramener ensuite à sa valeur initiale, proportionnellement à la vitesse de disparition de l'effet de la perturbation.

Les courbes de la figure 741 donnent pour chacun des trois modes de régulation une représentation simplifiée de l'évolution dans le temps de la valeur de la grandeur réglée après perturbation brutale.

L'action proportionnelle (courbe 1) laisse subsister un certain écart entre la

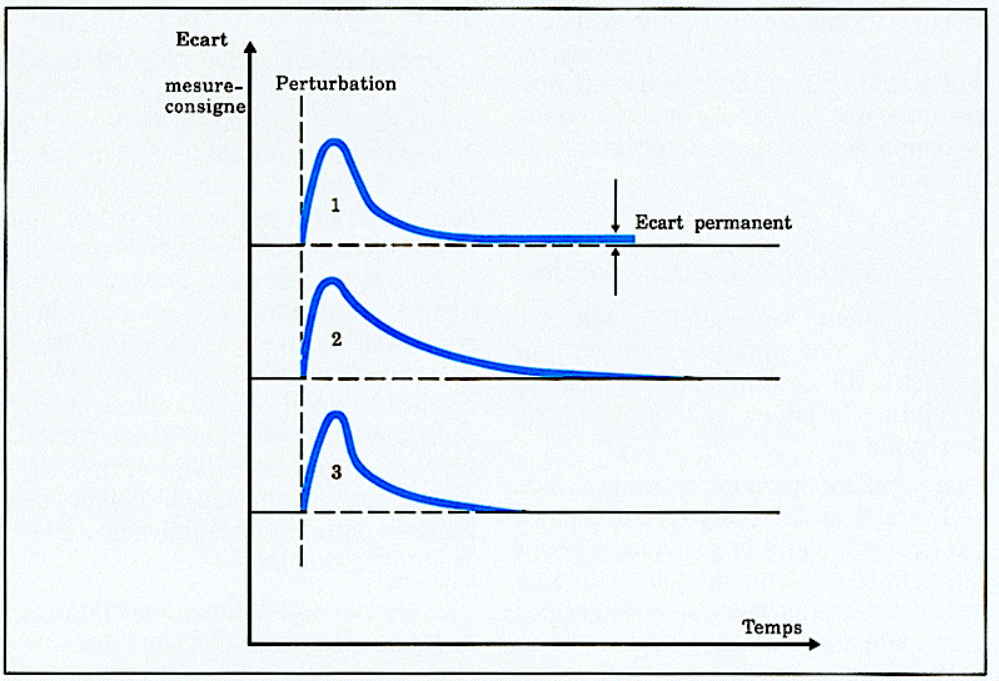


Figure 741. Courbe de réponse selon le mode de régulation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

valeur de consigne et la valeur mesurée de la grandeur réglée.

L'action proportionnelle et intégrale (courbe 2) ramène lentement la grandeur réglée à sa valeur de consigne.

L'action proportionnelle intégrale et dérivée (courbe 3) permet d'annuler plus rapidement l'écart créé par la perturbation.

Ces courbes ne donnent que l'allure générale du phénomène, le rééquilibrage s'accompagnant toujours d'oscillations plus ou moins importantes suivant le degré d'influence des différentes actions.

Ces trois modes de régulation conjugués n'ont donc d'autre but que de maintenir automatiquement à une valeur fixe prédéterminée une grandeur susceptible de variations. Souvent le problème à résoudre est plus complexe lorsqu'il s'agit d'établir une corrélation entre la valeur variable d'une certaine grandeur et une autre grandeur ou lorsqu'on doit établir, grâce à un **régulateur programmé,** une loi fixant l'évolution dans le temps de la valeur d'une grandeur physique.

2.2.3. Choix du mode de régulation

Tout problème de régulation doit être soumis à une analyse précise qui permette de déterminer le mode de régulation le mieux adapté et le type de régulateur.

La première opération consiste à choisir la grandeur de réglage (y) qui, couplée par la régulation à la grandeur à régler (x), permet d'obtenir la stabilisation de cette dernière à sa valeur de consigne (xo) à la suite de toute modification de la valeur de (x) provoquée par toute action extérieure (perturbation).

Cette grandeur de réglage une fois choisie, il convient d'examiner l'ensemble formé par l'installation, la mesure, la régulation, l'organe de correction. L'installation elle-même peut être plus ou moins sensible aux variations de la grandeur de réglage; elle peut présenter une inertie plus ou moins importante. L'organe de mesure de la grandeur réglée peut amener un certain retard dans la mesure, retard qui s'ajoute à celui de l'action correctrice du régulateur lui-même et à celui introduit par une certaine hystérésis de l'organe de correction. On conçoit que si ce retard est trop important, l'action correctrice peut se faire à contretemps, le déréglage ayant alors changé de sens.

Le choix du mode de régulation dépend donc de la nature de l'installation, de la précision et de la stabilité de réglage que l'on désire obtenir.

La **régulation à action proportionnelle** conduit à un réglage généralement peu précis. Cette précision est toutefois très souvent suffisante dans le cas d'une régulation de niveau, par exemple, pour laquelle on peut utiliser une bande d'action proportionnelle relativement faible, quitte à tolérer un léger pompage permanent. Dans d'autres cas, tel celui de la régulation du niveau d'eau d'un filtre, la présence d'un pompage peut être préjudiciable à la qualité de l'eau filtrée et il est préférable d'adopter une bande d'action proportionnelle assez large et de tolérer une différence de niveau de quelques centimètres entre un filtre fraîchement lavé et un filtre colmaté.

La **régulation à action proportionnelle et intégrale** permet d'obtenir une précision indépendante de la grandeur de la bande proportionnelle. L'action intégrale

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

agissant comme si elle augmentait exponentiellement en fonction du temps le coefficient d'action proportionnelle, on conçoit que ce mode de régulation puisse conduire dans le cas d'installations à grande inertie à un régime de fonctionnement instable.

La **régulation à action proportionnelle, intégrale et dérivée**, qui lie l'importance de l'action correctrice à l'évolution dans le temps des écarts de la grandeur réglée, permet le réglage automatique de systèmes par essence instables parce que susceptibles de perturbations soudaines et relativement importantes.

Par exemple, le réglage automatique du niveau de la bâche d'un dégazeur thermique peut se faire par une simple action proportionnelle sur la vanne régulatrice du débit admis, si la capacité de la bâche est suffisamment importante en regard du débit d'eau. Le réglage de la pression, qui doit être très précis, se fait par une action proportionnelle intégrale et dérivée si l'un des paramètres perturbateurs (débit d'eau, température de l'eau, pression de la vapeur) est susceptible de variations brutales; dans le cas contraire, l'action proportionnelle et intégrale est suffisante.

Pour certains problèmes du domaine du traitement des eaux, ces quatre modes de régulation pris isolément ne sont pas toujours suffisants et il est nécessaire de mettre en œuvre des boucles de régulation à réglages multiples. C'est le cas lorsque la valeur de la grandeur réglée est sous la dépendance des valeurs de plusieurs paramètres pouvant évoluer de façon indépendante et ayant chacun un effet important sur cette valeur. L'utilisation de l'un ou l'autre des modes classiques de régulation conduirait alors à une instabilité de l'installation, avec apparition d'un phénomène de pompage. Ainsi la teneur en chlore libre C d'une eau traitée à débit variable que l'on veut maintenir à une valeur constante est fonction de trois paramètres : le débit Q de l'eau à traiter, la demande en chlore D et le débit q du doseur de chlore pris comme grandeur de réglage. Le problème doit être résolu en réalisant dans un premier stade la proportionnalité de q à Q, sans attendre une variation de C par rapport à sa valeur de consigne et, dans un deuxième stade, en corrigeant les écarts de C. Lorsque l'installation présente une grande inertie, la régulation par TOR permet de résoudre simplement le problème. Dans ce cas, si l'organe de correction est une vanne, son ouverture se fait à intervalles de temps constants, pendant un temps proportionnel à Q ce qui réalise automatiquement la proportionnalité de q à Q. Cet intervalle de temps est corrigé automatiquement suivant la loi la mieux adaptée, en fonction des écarts de C par rapport à sa valeur de consigne.

L'ensemble formé par l'organe de mesure, le système à régler, l'organe de réglage et le régulateur constituant une chaîne bouclée, il est parfois nécessaire d'utiliser des **régulateurs à réaction** qui constituent eux-mêmes une boucle fermée, en ce sens qu'une fraction du signal de sortie du régulateur, dépendant du taux de réaction, est réinjectée à son entrée, le régulateur recevant un signal correspondant à la différence entre les signaux représentatifs de l'écart de grandeur à régler et de la réaction. Cette disposition, utilisée en particulier dans le cas de la régulation de niveau de filtre, en accroît la fidélité et la stabilité.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.4. Technologies programmées et modélisations

Les technologies de régulation ont longtemps été basées sur les régulateurs analogiques. Ces appareils sont toujours utilisés pour les processus simples ou très rapides. Cependant, on rencontre de plus en plus des systèmes de **régulation numérique.**

Un régulateur numérique fonctionne par **échantillonnage.** Les signaux émis des capteurs et la consigne sont digitalisés à intervalles de temps réguliers. Ces informations sont exploitées par un logiciel **(algorithme de régulation)** qui calcule périodiquement un signal de commande de l'actionneur.

Selon les moyens de calcul qui lui sont nécessaires et les autres besoins de l'installation, cet algorithme peut être implanté dans un régulateur à microprocesseur, un automate programmable, un calculateur de régulation, un micro-ordinateur, etc.

Certains algorithmes transposent les méthodes classiques des régulateurs analogiques. C'est ainsi que les actions proportionnelle (P), intégrale (I) et dérivée (D) peuvent être traduites en programmes de calcul exécutés périodiquement.

Le régulateur numérique peut surveiller d'autres paramètres que la grandeur réglante et la grandeur réglée et **changer d'algorithme** en fonction du contexte observé: le régulateur possède en mémoire plusieurs algorithmes et peut passer automatiquement de l'un à l'autre

- soit suivant la séquence du procédé (par exemple démarrage lent puis régulation de niveau d'un filtre AQUAZUR),

- soit après avoir observé un aléa, en particulier une défaillance de capteur. Par exemple la régulation du pompage de boues en excès d'une épuration biologique peut être différente suivant que les mesures de débit d'eau brute, de concentration des boues sont validées ou pas.

. **Régulateurs auto-adaptatifs**

Certains régulateurs numériques **autoadaptatifs** ont la faculté de corriger eux-mêmes les coefficients de régulation P, I et D en observant la réponse dynamique du procédé à chaque perturbation

valeur, période et amortissement de l'oscillation (figure 742 a).

Ces régulateurs auto-adaptatifs peuvent rendre de précieux services pour les procédés dont l'identification est difficile (conditions de fonctionnement mal connues).

Pour des procédés complexes mais connus, on utilise une régulation à base d'un modèle déterministe: un calcul mathématique permet de prévoir la réponse théorique Xm du processus à une sollicitation. La comparaison de cette valeur à la réponse réelle XP permet d'adapter l'algorithme du régulateur ajustable (voir figure 742 b).

Dans le cas de procédés complexes mal connus ou en l'absence de capteurs représentatifs et fiables de la grandeur réglée, l'application de calculs statistiques permet de déceler les paramètres mesurables ayant une corrélation avec le processus à régler. Cela nécessite le stockage de nombreux paramètres sur une longue période de temps. On aboutit à un modèle stochastique (figure 742 c et p.1112). Ce peut être le cas par exemple de la détermination d'une dose de coagulant pour la floculation d'une eau de surface dans une installation donnée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

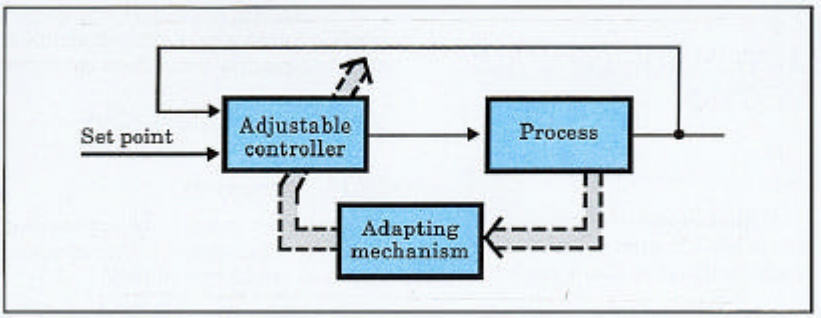


Figure 742a. Adaptive system, without model.

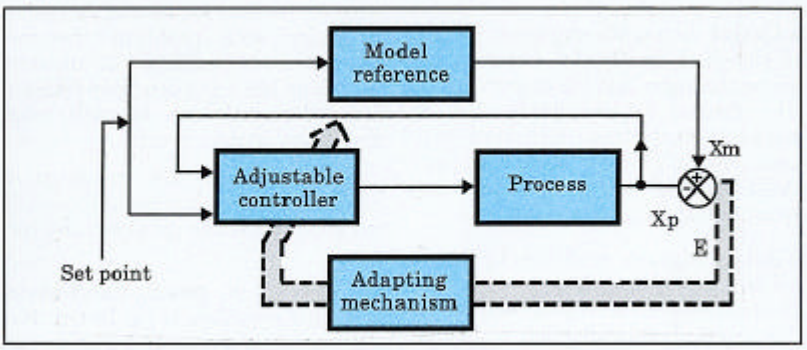


Figure 742b. Adaptive system, with model reference.

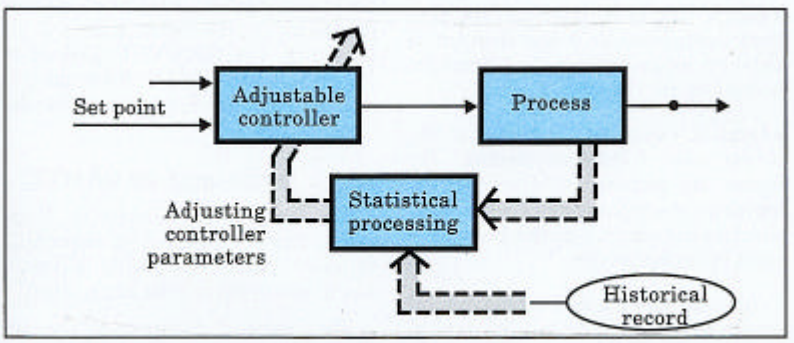


Figure 742c. Adaptive system, with stochastic model.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.3 AUTOMATISMES

2.3.1. Automatismes combinatoires

Un automatisme combinatoire est un système dans lequel, à une combinaison des entrées, correspond une combinaison, et une seule, des sorties.

La description de ce type d'automatisme peut s'effectuer de quatre manières différentes (figure 743)

. La description littérale dans laquelle un ensemble de phrases décrit la correspondance entre les entrées et les sorties. Cette méthode présente l'inconvénient de devoir être interprétée à plusieurs reprises et en particulier par l'automaticien
chargé de la réalisation, pour lever de fréquentes ambiguïtés ou insuffisances de précision.

. Le schéma à relais très utilisé par les électriciens dans lequel les entrées sont les contacts et les sorties sont les relais. On l'appelle également schéma à contact ou schéma en échelle.

. La représentation symbolique très utilisée par les électroniciens et dans laquelle, si le schéma se lit de gauche à droite, les entrées figurent à gauche et les sorties à droite.

. L'équation logique dont les règles d'écriture sont régies par **l'algèbre de BOOLE:** les E/S sont représentées paf des **variables** et l'identité entre la combinaison des variables d'entrée et celle des variables de sortie se représente par un signe égal.

L'analyse des automatismes combinatoires utilise des combinaisons de fonctions logiques: identité, complément, ET, OU.

Il est rare qu'un automatisme soit purement combinatoire et souvent il s'agit plutôt d'automatisme séquentiel.

2.3.2. Automatismes séquentiels

2.3.2.1. Les outils disponibles

Un automatisme est dit séquentiel si, pour une même situation des entrées, on peut trouver diverses situations des sorties.

La connaissance des seules entrées ne suffit plus: il faut aussi connaître la situation dans laquelle se trouvait le système antérieurement La résolution de tels problèmes nécessite alors l'introduction de fonctions de mémorisation (on parle aussi de relais auxiliaires ou de variables internes) qui sont des sorties utilisées comme des entrées.

Plus généralement, le fonctionnement est exprimé sous forme d'une suite de plusieurs séquences de correspondance entre les entrées et les sorties.

Devant la complexité croissante des automatismes séquentiels, il est apparu nécessaire de créer un outil de description des automatismes compréhensible aussi bien par le concepteur du procédé que par l'automaticien responsable de la partie commande et l'utilisateur final du système. Le GRAFCET répond mieux que les autres systèmes de représentation à cette exigence (norme NF C03190).

2.3.2.2. Définition du GRAFCET

Le GRAFCET (ou Graphe de Commande Étape Transition) est un outil privilégié de description des automatismes séquentiels.

La description du fonctionnement de l'automatisme est décomposée en étapes: une étape correspond à un état bien

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

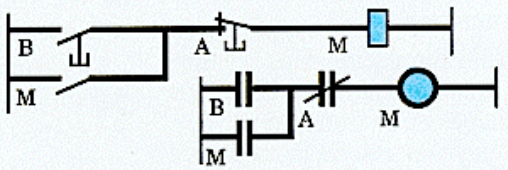
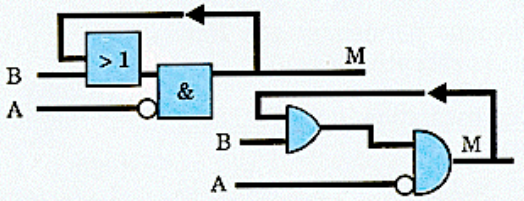
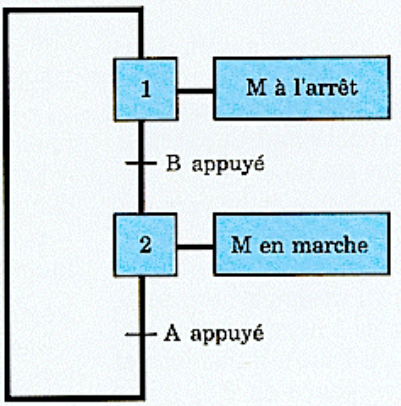
Description littérale	Le moteur M se met en marche par appui sur le bouton B et s'arrête par appui sur le bouton A.
Schéma à relais	
Représentation symbolique	
Algèbre de BOOLE	$M = (B + M) \cdot \overline{A}$ + : fonction OU · : fonction ET $\overline{A}$: fonction NON
GRAFCET de 1er niveau	

Figure 743. Exemple de représentations différentes d'un même problème.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

défini du système et, en particulier, à un état stable de la partie commande. L'évolution du système d'un état donné (étape) vers un autre état différent (une autre étape) n'est autorisée que si une condition logique sur les entrées est satisfaisante: la transition.

Le GRAFCET représente donc les automatismes séquentiels par une succession alternée d'étapes et de transitions

- à chaque étape on associe les actions à effectuer,
- à chaque transition on associe une condition logique permettant son franchissement: la réceptivité.

2.3.2.3. Représentation du GRAFCET
(figure 744)

Une étape se représente par un carré repéré numériquement.

Pour chaque étape, on précise les actions à effectuer, décrites de façon littérale ou symbolique, à l'intérieur d'un ou plusieurs rectangles (étiquette) reliés à la partie droite de l'étape par un trait.

Une transition se représente par un trait perpendiculaire à la liaison entre les étapes.

La réceptivité associée s'écrit, sous forme littérale ou symbolique, à droite du symbole de transition. Elle se note sous forme d'équation booléenne. Une réceptivité toujours vraie est notée "= 1".

Une liaison depuis une étape vers plusieurs autres étapes s'appelle une divergence. Une divergence en OU, qui se représente par un trait simple horizontal, permet un choix de "chemins possibles" selon que l'une ou l'autre transition est vérifiée. Une divergence en ET, qui se représente par un double trait horizontal après une transition, oblige le passage simultané à toutes les étapes suivantes lorsque cette transition est vérifiée.

Une liaison depuis plusieurs étapes vers une seule s'appelle une convergence.

Une convergence en OU, représentée par un simple trait, traduit la possibilité de plusieurs "chemins" possibles pour atteindre l'étape suivante.

Une convergence en ET, représentée par un double trait, nécessite que toutes les étapes antérieures soient simultanément actives et la transition validée pour passer à l'étape suivante.

2.3.2.4. Règles d'évolution du GRAFCET

Le fonctionnement du GRAFCET repose sur cinq règles de base

Règle n° 1

La ou les étapes initiales représentées à l'aide d'un double trait sont les étapes qui doivent être actives au début du fonctionnement (après une coupure de courant par exemple).

Règle n° 2

Une transition est validée si toutes les étapes qui la précèdent sont actives. Une transition est franchie si elle est validée et si la réceptivité associée est vérifiée.

Règle n° 3

Le franchissement d'une transition implique:

- l'activation de toutes les étapes immédiatement suivantes,
- la désactivation de toutes les étapes immédiatement précédentes.

Règle n° 4

Dans le même GRAFCET, plusieurs transitions simultanément franchissables sont simultanément franchies.

Règle n° 5

Si une étape est simultanément activée et désactivée, elle reste active.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

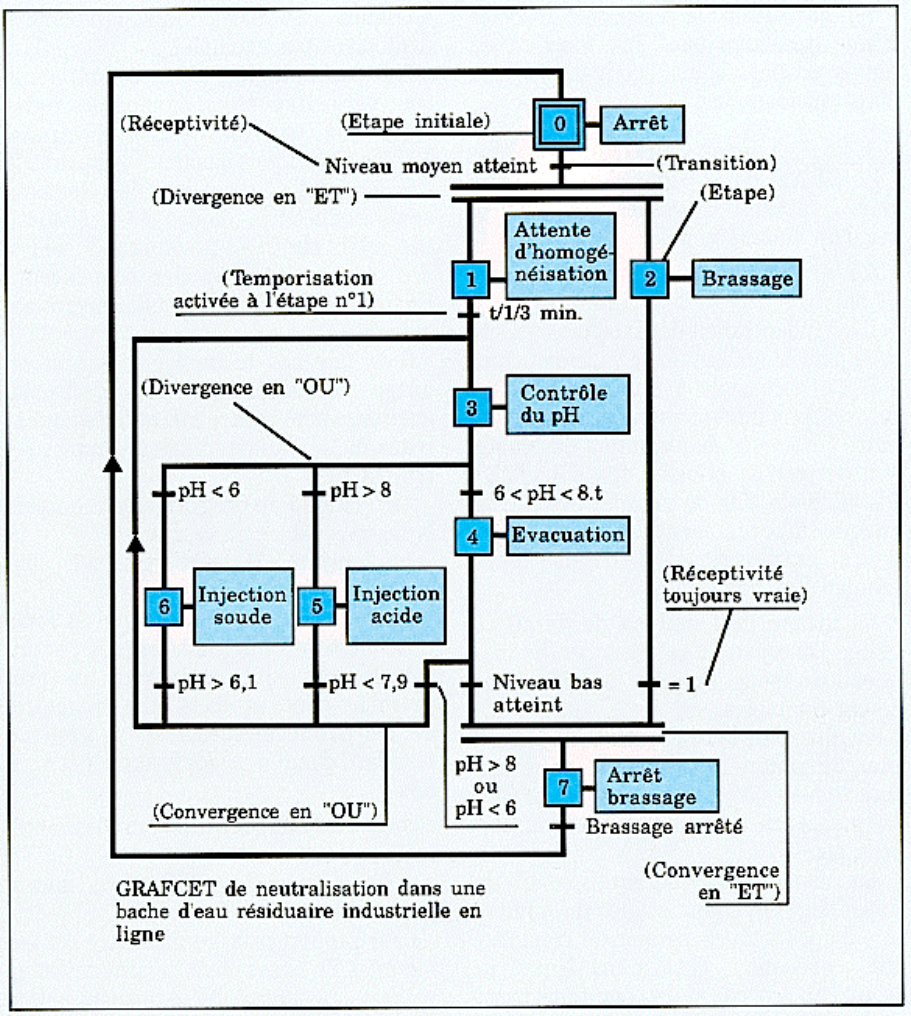


Figure 744. Exemple de GRAFCET.

2.3.2.5. Différents types d'actions associées à une étape

- action inconditionnelle: dure pendant que l'étape est active,
- action conditionnelle: est réalisée pendant que l'étape est active, si une condition associée est vérifiée,
- **action temporisée:** est réalisée pendant que l'étape est active, après l'écoulement d'une temporisation par rapport au moment de l'activation de l'étape,
- action impulsionnelle : est réalisée pendant un certain temps à partir du moment de l'activation de l'étape

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **temporisation**: la réceptivité associée à une transition peut être fonction du temps écoulé depuis l'activation d'une étape quelconque.

2.3.2.6. Les apports du GRAFCET

Le GRAFCET est graphique et rigoureux. Il est utilisé à tous les niveaux de la vie d'un automatisme.

Au niveau de la **définition** du problème

- il est indépendant de la technologie utilisée pour la réalisation de l'automatisme, - il est accessible à tous car c'est un moyen de communication et de dialogue entre personnes de formation différente, - il permet de réaliser des GRAFCET fonctionnels, dits de premier niveau, où chaque étape représente une fonction globale et les transitions sont définies d'une manière littérale (figure 743).

Au niveau de **l'analyse de détail**: il oblige l'analyste à se poser les bonnes questions pour que les spécifications soient complètes.

Au niveau de la **réalisation**: de plus en plus de matériels se mettent en œuvre directement à partir du GRAFCET (séquenceurs, automates programmables, etc.).

Au niveau de **l'exploitation** et du dépannage: la connaissance du numéro des étapes actives permet de connaître très exactement l'état dans lequel se trouve un procédé et les conditions précises pour qu'il évolue. Des GRAF d'aide ou de dépannage peuvent même être conçus pour guider l'exploitant.

2.3.3. Technologies de réalisation de la partie commande

Les technologies pneumatiques ne sont pratiquement plus utilisées, hormis quelques cas particuliers (ambiances explosives par exemple).

Les **technologies câblées** sont réalisées par juxtaposition de modules reliés entre eux par un câblage électrique (câbles électriques ou circuits imprimés). Ces modules peuvent être des éléments semi-conducteurs (diodes et transistors), des relais statiques à semi-conducteurs, des circuits intégrés, des séquenceurs électroniques, ou des relais électromagnétiques.

Bien que ces technologies soient en usage décroissant, les relais électromagnétiques sont encore très utilisés pour la réalisation d'automatismes simples et **d'interfaces**.

La **technologie programmée** diffère de la logique câblée en ce que

- les fonctions logiques et calculs sont assurées par un processeur,

- les liaisons entre les différentes fonctions ne sont plus matérialisées par un câblage physique mais par un programme contenu dans une mémoire. Celui-ci permet de spécialiser un système standard pour une application déterminée.

On peut distinguer trois grandes familles

a - Les systèmes spécifiques à **micro-processeurs.**

Leur rapport prix/performance est faible mais ils nécessitent de gros investissements en conception et mise au point; ils sont donc bien adaptés aux appareils de grande diffusion.

Dans le domaine du traitement des eaux, on les trouve de plus en plus dans des appareils spécifiques, tels que régulateurs, capteurs, etc., paramétrables dits "**programmables**".

b - Les **automates programmables industriels ou API.**

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ce sont des appareils spécialement étudiés pour la réalisation d'automatismes en **environnement difficile**, simples à mettre en couvre pour des automaticiens.

c - Les mini ou micro-ordinateurs.

De moins en moins utilisés pour des automatismes locaux (au profit des API), ils restent par contre, un outil privilégié de réalisation d'automatismes nécessitant une très grande capacité de mémoire (par exemple systèmes hiérarchisés, algorithmes basés sur des calculs statistiques, modèles mathématiques, calculs matriciels, systèmes experts, etc.). Ils doivent être installés dans des ambiances adaptées.

2.4. LES AUTOMATES PROGRAMMABLES INDUSTRIELS

2.4.1. Définition

"Un automate programmable industriel est une machine électronique programmable par un personnel non informaticien, destiné à piloter en ambiance industrielle et en temps réel des procédés logiques séquentiels et combinatoires."

Cette définition qui date de 1979 pourrait être complétée car beaucoup d'API modernes sont capables également d'effectuer des calculs et des régulations, de communiquer, de gérer des périphériques informatiques, etc.

Bien qu'étant de structure informatique, les API se démarquent nettement des mini calculateurs et des microprocesseurs, en ce sens qu'ils sont conçus pour. - travailler en milieu industriel (fiabilité remarquable malgré des contraintes de température, parasites, etc.),

- être exploités par du personnel relativement peu spécialisé.

2.4.2. Les principes de fonctionnement des API

. **Structure de l'appareil**

Un API est principalement composé

- des interfaces d'entrées et de sorties où viennent se raccorder respectivement les capteurs et les actionneurs,
- d'une unité centrale qui pilote les échanges d'informations entre les différents composants et comprend:
- une unité arithmétique et logique qui exécute les instructions logiques de base,
- une mémoire où est stockée la liste des instructions à exécuter, c'est-à-dire le programme, - d'une alimentation, - d'une liaison entre les différentes cartes électroniques (bus).

. Fonctionnement classique

Les instructions sont lues et exécutées une à une par l'unité centrale du début jusqu'à la fin du programme, puis le cycle suivant recommence et ainsi de suite. Un cycle dure entre 1 et 100 millisecondes selon l'automate et la longueur du programme.

. Fonctionnement multitâche et multiprocesseur

De plus en plus d'automates programmables fonctionnent en "multitâche",

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

c'est-à-dire que, pendant un cycle de programme, des interruptions peuvent survenir pour demander l'exécution d'une tâche particulière. Une interruption est un signal prioritaire déroutant momentanément l'exécution du programme. Cette possibilité permet d'effectuer des automatismes à faible temps de réponse, par exemple: comptage d'impulsions, positionnement précis d'un organe de réglage, etc.

Ces automates disposent généralement de possibilités d'adjonction de cartes électroniques intelligentes afin que l'ensemble de l'automate fonctionne en multiprocesseur, c'est-à-dire que différentes
tâches soient exécutées en parallèle par des processeurs différents.
Selon les marques d'automates, on peut
disposer de cartes: d'entrées analogiques, de régulation, de comptage, de communication, de dialogue opérateur, etc.

2.4.3. Programmation

Une console de programmation permet l'écriture, la mise au point et l'introduction du programme dans la mémoire de l'automate. Elle n'est plus nécessaire lors du fonctionnement normal de l'automate, sauf si l'on doit modifier le programme.

On distingue plusieurs catégories de consoles et notamment
- celles qui utilisent la mémoire de l'automate et donc ne fonctionnent que si **elles sont raccordées** à l'automate,
- celles qui ont une mémoire propre et
peuvent fonctionner de manière **autonome.**

La disparité des tailles et des prix des consoles de programmation dépend aussi des possibilités offertes au niveau des langages de programmation qui peuvent être:

- le langage mnémonique,
- le langage booléen,
- le langage à relais (graphique),
- le langage grafcet (graphique),
- le langage de type informatique.

Certains constructeurs proposent une possibilité de programmer leurs automates à partir de micro-ordinateurs de bureau, ce qui évite l'achat d'une console de programmation lors de la conception des programmes mais peut présenter des inconvénients lors de l'utilisation sur le terrain.

La console de programmation, outil du concepteur, qui permet une intervention au niveau des instructions du programme doit être distinguée de la **console de paramétrage,** outil de l'exploitant qui permet de modifier les paramètres de fonctionnement des programmes (par exemple la valeur des temporisations, des consignes, etc.), sans risquer d'introduire des erreurs dans les programmes.

2.4.4. Choix des automates programmables

La diversité de l'offre des constructeurs rend ce choix problématique pour un nonspécialiste.

. **Adéquation de l'automate aux besoins**

La distinction entre bas de gamme et haut de gamme devient de plus en plus floue et les critères de comparaison les plus souvent utilisés sont
- les types de langages possibles et leur étendue,
- le nombre d'E/S (taille de l'automate), - les type d'E/S,
- la taille et le type de mémoire,
- les possibilités de communication,
- les facilités d'aide à la maintenance,
- les facilités offertes pour les modifications de paramètres.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

. Adéquation de l'automate au site

Il est souvent souhaité d'utiliser une même marque de matériel, pour éviter les problèmes de compatibilité et diminuer le stock de pièces de rechange. Ce critère est de moins en moins justifié, compte tenu de l'offre actuelle des constructeurs. Il est fréquent que pour une même gamme d'un même constructeur des automates différents ne soient pas de programmation compatible et du fait de la rapidité des développements technologiques, le recours à un seul constructeur ne garantit plus des besoins minimaux en pièces de rechange.

Par contre, la compatibilité de communication des données est plus importante; les constructeurs multiplient les passerelles et proposent des protocoles de communication standard.

2.4.5. Précautions de mise en œuvre

L'utilisation des automates programmables pour la réalisation d'automatismes simples et complexes a permis de gros progrès en matière de fiabilité et de performance des installations réalisées, encore faut-il prendre garde de respecter quelques précautions de mise en œuvre.

. Environnement

La plupart des automates programmables industriels sont capables de résister à un environnement industriel sévère en ce qui concerne les poussières, la température, les parasites, etc. Il faut cependant, respecter les conditions minimales imposées par les constructeurs concernant par exemple l'isolement électrique, l'absence de condensation et la protection contre les vapeurs corrosives.

. **Sécurité**

Un automate programmable présente un très bon niveau de fiabilité mais une panne, bien que rare, demeure possible

dans ce cas, l'état des sorties est aléatoire. Pour cette raison un automate programmable ne peut pas être utilisé pour assurer des fonctions de sécurité qui peuvent mettre en jeu la protection des travailleurs ou la pérennité du matériel commandé, sans aménagement extérieur.

. **Paramétrage**

Des dispositifs permettant de pouvoir modifier des paramètres de l'installation devront être prévus pour améliorer le dialogue homme - machine.

Une formation adéquate du personnel d'exploitation est indispensable, afin de familiariser celui-ci avec ce nouveau mode de commande.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. LE CONTRÔLE AUTOMATIQUE EN TRAITEMENT D'EAU

3.1 PRINCIPALES FONCTIONS D'AUTOMATISME

Dans les usines de traitement d'eau, l'évolution de la qualité de la matière première qu'est l'eau brute est généralement relativement lente. Les variations des quantités à traiter, qui dépendent des variations de l'apport en eau brute (cas des eaux résiduaires) ou de la demande en eau traitée (cas des eaux potables ou industrielles), sont par contre souvent importantes et le débit est généralement un paramètre essentiel dans l'automatisation des installations.

L'inertie de la plupart des traitements biologiques mis en œuvre, la complexité des phénomènes de coagulation - floculation rendent par contre parfois plus aléatoire l'intérêt ou la fiabilité de la régulation complète du processus épuratoire proprement dit, d'autant qu'un certain nombre de capteurs (surtout sur les ERU) ne sont pas disponibles ou ne sont pas opérationnels au niveau industriel.

La progression des connaissances ainsi que des technologies de mesure permet graduellement de combler ces handicaps et d'accroître les possibilités de modélisation; d'autre part, la mise au point des systèmes experts repose sur l'intégration systématique des observations et déductions de personnel exploitant expérimenté.

L'usine entièrement automatisée sans intervention humaine cependant n'existe pas. Même si aucun personnel d'exploitation n'est présent en continu sur le site, des agents sont nécessaires pour assurer la maintenance (entretien et dépannages), certaines tâches de réglage, la surveillance de routine (qui permet en particulier de faire face aux situations imprévues), l'établissement de diagnostics sur des périodes plus ou moins longues. L'accumulation des observations et le perfectionnement des outils informatiques nécessitent aussi la mobilisation du personnel.

Toutefois, un grand nombre de fonctions d'automatisme sont déjà réalisées couramment dans les installations de traitement d'eau. Les plus courantes sont présentées ci-dessous, sans vouloir couvrir tous les cas d'application ni prendre en compte les importants progrès en devenir.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2. PRINCIPAUX AUTOMATISMES DANS UNE STATION DE CLARIFICATION ET DE FILTRATION

<table>
<tr><th>FONCTION AUTOMATISÉE</th><th>PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE</th><th colspan="2">MOYEN</th><th colspan="2">OBSERVATIONS</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Pompage eau brute</td><td>Niveaux hauts et bas de la bâche eau traitée</td><td colspan="2">Fonctionnement tout ou rien</td><td colspan="2">Petites installations dont le traitement est capable de se mettre en route et de s'arrêter automatiquement</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mesure de niveau bâche eau traitée pour maintien niveau constant</td><td colspan="2">Variation de combinaison de pompes</td><td rowspan="2">Complexe. A réserver à des cas exceptionnels de très faible volume de réserve</td><td rowspan="2">Usine de traitement asservie au débit</td></tr>
<tr><td colspan="2">Régulation de débit par variation vitesse pompe</td></tr>
<tr><td>Mesure de niveau bâche eau traitée et coût d'énergie selon l'heure</td><td rowspan="2">Variation du Débit pour bilan énergétique le plus faible (débit max. la nuit par exemple)</td><td>Variation de combinaison de pompes</td><td>Par API ou micro-ordinateur (§ 3.6.1.)</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>Variation vitesse pompe</td><td>Évite les à-coups de débit de la station de traitement</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Pompage eau traitée</td><td colspan="5">Mêmes possibilités que pour le pompage eau brute à partir du niveau de réservoir de distribution</td></tr>
<tr><td>Niveaux réservoirs, météorologie, prévision de consommation</td><td colspan="2">Modèles mathématiques ou Systèmes experts pour déterminer les consignes</td><td colspan="2">Très complexe. A réserver aux réseaux de distribution importants alimentés par plusieurs usines</td></tr>
<tr><td>Débit réactif (coagulation – floculation, charbon actif en poudre)</td><td>Débit eau</td><td colspan="2">Proportionalité au débit, la dose étant fixée par essai de floculation</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Dose de réactif de coagulation (débit réactif/débit eau brute)</td><td>SCD (Stream Current Détection)</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">En développement</td></tr>
<tr><td>Divers selon l'eau considérée, par exemple turbidité, oxydabilité, pH, température, ...</td><td colspan="2">Algorithme particulier à l'eau considérée</td><td colspan="2">Étude spécifique</td></tr>
</table>

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

FONCTION AUTOMATISÉE	PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE	MOYEN	OBSERVATIONS
Extraction de boues de décantation	Débit eau	Syncopage porportionnel au débit d'eau	Répartir les ouvertures de vannes pour réduire le débit instantané maximal de boue extraite
	Débit eau et niveau lit de boue	Syncopage proportionnel au débit et fonction du niveau du lit de boue	Pour appareils à densification de boue
	Débit eau et concentration boue extraite	Syncopage proportionnel au débit avec arrêt à seuil bas de concentration de boue extraite	
Marche – arrêt filtre	Débit eau à filtrer	Calcul du nombre de filtres en filtration	A réserver à quelques cas particuliers.
Enclenchement d'un lavage de filtre	Perte de charge	Automate programmable avec gestion de priorités ne pour concerner qu'un seul filtre à la fois	Informations conditionnelles de remplissage bâches, disponibilité des organes communs, heures creuses, etc.
	Temps de filtration		
Déroulement d'un lavage de filtre	Temporisations	Automatisme séquentiel	
Régulation filtre	Niveau d'eau dans le filtre	Régulation spécifique avec démanage lent de préférence	Voir chapitre 13, § 5.2.2
Désinfection chlore	Résiduel de chlore		
Désinfection ozone	Débit eau et résiduel d'ozone	Régulation spécifique	

3.3. PRINCIPAUX AUTOMATISMES DANS UNE STATION D'EAU RÉSIDUAIRE

FONCTION AUTOMATISÉE	PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE	MOYEN	OBSERVATIONS
Pompage eau brute	Capteurs TOR de niveau de la bâche (ou seuils de mesure de niveau)	Marche à niveau haut et arrêt à niveau bas (relais ou API)	Volume de marnage à calculer en fonction du débit, du nombre de horaires démarrages des pompes et du mode d'automatisme
		Permutation cyclique de pompes à chaque démarrage (API)	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

FONCTION AUTOMATISÉE	PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE	MOYEN	OBSERVATIONS	
Pompage eau brute	Mesure de niveau analogique	Variation de vitesse pompe centrifuge pour maintenir un niveau constant	A réserver pour de gros débits et faibles volumes de marnage	
		Variation de combinaisons de pompes		
Appareils de pré-traitement (dégrillage, dessablage, dégraissage)	Temps de fonctionnement, heure de la journée	Fonctionnement syncopé, paramétré manuellement, de certains équipements	Fonctionnement forcé par niveau très haut (dégrillage)	
	Débit eau	Fonctionnement syncopé proportionnel au débit avec permutation **éventuelle**	Pour installations importantes à débit variable	
Décantation pri-maire : extraction des boues fraîches	Temps de fonctionnement	Fonctionnement syncopé paramétrable	Classique	Faire attention à une extraction équilibrée entre plusieurs dé-capteurs en parallèle ainsi qu'à la charge acceptable par le poste de traitement de boues
	Débit eau	Fonctionnement proportionnel au débit		
	Débit eau et voile de boue	Débit variable dépendant du débit d'eau et de la hauteur du voile de boue	Voir la validité de la mesure du niveau de voile de boue	
	Débit eau et concentration boues extraites	Débit variable dépendant du débit d'eau et de la concentration des boues	Arrêt si concentration faible (renard). Surveiller la validité de la mesure de concentration	
Aération mécanique	Temps de fonctionnement, heure de la journée	Fonctionnement syncopé paramétrable manuellement	Petites installations où les conditions de brassage sont prépondérantes	
	Oxygène dissous	Marche -arrêt en fonction de seuils haut et bas	Ajouter des conditions de temps de fonctionnement mirai et de temps d'arrêt maxi (pour brassage correct)	
	Heure, temps de fonctionnement, débit, oxygène dissous	Automate programmable spécialisé. Voir § 3.6.4	Installation de plus de 2 aérateurs de surface	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

FONCTION AUTOMATISÉE	PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE	MOYEN	OBSERVATIONS	
Aération par insufflation d'air	Temps, heure de la journée	Variation du nombre d'organes d'aération	Petites installations équipées de surpresseurs sans variation de débit	
	Oxygène dissous	Variation de débit d'air pour maintenir une concentration d'oxygène dissous constante (variation de vitesse du surpresseur ou de position de ventelles de soufflante) Gestion des soufflantes par API		Pour instal. Importantes la fiabilité et la représentativité de la mesure d'oxygène sont fondamentales
Cas de plusieurs bassins et d'une seule centrale d'air	Oxygène dissous et débit d'air	Idem à précédemment + répartition d'air par régulation de vannes de répartition. Nécessite un API de régulation	Les pertes de charge induites par les vannes de répartition doivent être les plus faibles possibles (une vanne constamment ouverte). Voir § 3.6.3	
Recirculation de boues secondaires	Temps de fonctionnement heure	Fonctionnement syncopé paramétrable manuellement	Petites installations	
		Variation du nombre de pompes en service	Valeur maximale du débit d'alimentation du clarificateur à ne pas dépasser	
	Débit EB	Proportionnalité du débit de recirculation au débit EB		
	Débit EB et voile de boue	Débit variable dépendant du débit EB et de la hauteur du voile de boue	A condition que l'indice de MOHLMAN soit bas	
Extraction de boues en excès de l'épuration biologique	Temps de font-bonnement, heure	Fonctionnement syncopé paramétrable manuellement	Classique	Extraction sur une ou plusieurs périodes journalières ou encore répartie sur la journée selon les possibilités dépaississerrent et de traitement des boues
	Débit d'eau journalier	Volume de boue extrait chaque jour proportionnel au débit d'eau journalier		
	Concentration de boues en aération	Volume de boue extrait chaque jour pour maintenir constante la concentration de boue moyenne journalière	Attention à la représentativité de la mesure de concentration (heure de la journée, conditions de brassage, point de mesure, etc.)	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

FONCTION AUTOMATISÉE	PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE	MOYEN	OBSERVATIONS
Méthanisation d'eau	Température	Régulation de (apport calorifique	
	Débit alimentation	Pompage régulier (temps pompage ou régulation débit)	
	pH	Apport d'un alcalinisant	
Neutralisation, décyanuration, déchromatation	Capteur approprié pH, rH, etc.	Régulation de 1a quantité de réactifs	

3.4. PRINCIPAUX AUTOMATISMES D'UNE INSTALLATION D'ÉCHANGE D'IONS

FONCTION AUTOMATISÉE	PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE	MOYEN	OBSERVATIONS
Marche - arrêt une seule chaire	Niveau bâche eau traitée	TOR	Attention à garder suffisamment de réserve d'eau traitée utilisable pendant la régénération
		Régulation du débit pour maintien d'un niveau constant bâche pleine	
Marche – arrêt deux chaires	Niveau bâche eau traitée	Idem au cas d'une chaîne; l'autre est en régénération ou en attente après régénération	
Marche – arrêt trois chaires	Niveau bâche eau traitée	Fonctionnement de deux chaînes: idem au cas d'une chaîne; la troisième est en régénération ou en attente après régénération. Permutation cyclique à chaque régénération	Nécessite parfois le déclenchement d'une régénération à titre préventif pour disposer d'une capacité de production potentielle suffisante
	Niveau bâche eau traitée et volume passé dans chaque chaire	Fonctionnement tout ou rien en cascade ou régulation de débit de chaque ***chaire de*** manière à passer le maximum de débit sur la chaire la plus saturée.	Complexe mais permet de disposer d'une capacité de production potentielle importante à tout moment.
Enclenchement d'une régénération	Volume passé	Seuil sur une totalisation de débit de la chaire depuis la dernière régénération	
	Volume passé et qualité d'eau traitée	Enclenchement si une condition est remplie: seuil de volume ou de qualité	La qualité d'eau mesurée dépend de la finalité du traitement: conductivité, pH, Na, nitrates, etc.
Régénération d'échangeurs d'ions	Temps et niveaux	Séquentiel	La complexité dépend du procédé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.5. PRINCIPAUX AUTOMATISMES EN TRAITEMENT DE BOUES(1)

FONCTION AUTOMATISÉE	PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE	MOYEN	OBSERVATIONS
Épaississeurs de boues	Temps de fonctionnement des organes d'alimentation et d'extraction	Régularité des débits entrée et sortie pour éviter des temps de séjour trop longs ou trop courts	Incidence sur les automatismes des ouvrages situés à l'amont et à l'aval
	Temps et qualité surnageant	Extraction continue ou syncopée forcée si surnageant chargé (voile de boue haut)	
	Temps et concentration sortie	Extraction si concentration minimale atteinte (avec temps d'arrêt limité)	Attention à la représentativité de la mesure de concentration
	Débit et éventuellement concentration entrée	Proportionnalité des flux de boue d'origines différentes	
Digesteur	Température	Régulation de température	La grande inertie permet d'accepter un apport de calories discontinu
	Débit d'alimentation	Pompage de boue fraîche ou épaissie le plus régulier possible (temps de pompage, débit- mètre ou nombre de cuvées)	Importance de la répartition sur plusieurs digesteurs en parallèle
Déshydratation de boues par filtre à bandes presseuses (S U P E R-PRESSDEG)	Heure	Marche et arrêt par horloge	A condition que la qualité de boue soit constante
	Capteurs spécifiques	Régulation du débit de boue et polymère par API spécifique	Voir § 3.6.5
Évacuation des boues	Remplissage bennes de réception	Transporteur orientable	
Préparation de polymères	Niveau bac	Préparation par bâchées	
	Poids trémie, débit eau	Préparation continue à concentration constante	
Flottateur	Débit eau à flotter	Nombre de circuits de détente	
	Lit de boue	Rythme de l'extraction des boues flottées	

(1) En dehors des automatismes propres aux appareils (fonctionnement et sécurités).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

FONCTION AUTOMATISÉE	PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE	MOYEN	OBSERVATIONS
Flottateur	Concentration boues de fond	Rythme des purges	
	Concentration du sous-nageant	Quantité de réactifs	Pour boues d'hydroxyde
Alimentation filtre-presse	Débit - pression	Remplissage filtre-presse à gros débit puis maintien de pression	
Préparation boue floculée pour filtre-presse	Niveau bâche	Pompage boue et dosage de réactifs à débit constant	Préparation pour bâchée
	Débit boue	Proportionnalité débit de réactifs au débit de boue (pompe, débitmètre)	Préparation en continu
	Débit concentration de boue	Proportionnalité débit de réactifs au flux massique	Attention à la représentativité de la mesure de concentration de boue
Arrêt filtration filtre-presse automatique	Débit filtrat		Autorise déclenchement débâtissage
Centrifugeuse	Couple	Variation de la vitesse de la vis et du débit de boue	Un couple excessif enclenche un lavage
	Concentration centrat	Variation de débit de polymère et/ou de boue	
	Débit- - concentration boue	Variation de débit polymère en fonction du flux massique de boue	Attention à la représentativité de la mesure de la concentration
Séchage thermique direct	Température sortie fumée	Régulation de boue ou du flux thermique	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

FONCTION AUTOMATISÉE	PARAMÈTRES DE RÉFÉRENCE	MOYEN	OBSERVATIONS
Four d'incinération	Températures débits gaz et fumées, oxygène fumées	Réglage des débits de boue, débits d'air, recyclages de gaz,apport fioul d'appoint	Plusieurs régulations interdépendantes gérables par API de configuration variable selon type de four
Dépoussiéreur d'incinérateur	Température	Réglage des débits eau de lavage	Laveur humide
		Réglage air de refroidissement	Épurateur électrostatique
Thermopostage	Température air extrait	Régulation des débits d'air	
Désodorisation par laveurs	pH, rH, Cl_2, selon réactifs	Régulation de la quantité de réactifs	

3.6. QUELQUES EXEMPLES DE RÉALISATIONS PARTICULIÈRES

3.6.1. Pompage en distribution d'eau

La sûreté de l'approvisionnement en eau potable est largement dépendante du fonctionnement automatique du pompage ainsi que des capacités de stockage disponibles.

L'opération de pompage est la plus coûteuse en énergie et les efforts d'automatisation ont généralement pour objectif la minimisation de coûts d'énergie.

On utilise pour cela la capacité des réservoirs intermédiaires ou de distribution pour décaler le plus possible les périodes de pompage dans des tranches horaires à faible coût d'énergie. Cela revient le plus souvent à pomper l'eau et aussi à la traiter à débit minimal (voire nul) pendant les heures de pointe tarifaires, alors que pendant la nuit le débit pompé est maximal.

Dans de petites installations, on se contente d'utiliser des systèmes d'horloges préprogrammés, qui présentent l'inconvénient de ne pas savoir s'adapter à des situations exceptionnelles.

Dans les installations très complexes, surtout s'il y a des possibilités de maillage, de sources d'approvisionnement diverses, etc., l'agent de conduite reste indispensable et il est aidé par un système d'aide à la décision par modèle mathématique ou système expert.

C'est le cas par exemple de la distribution d'eau de l'ouest de la région parisienne depuis le dispatching du PECQ de la Lyonnaise des Eaux (figure 745).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans une majorité de cas, où un poste de pompage alimente un réservoir unique, mais important, un automate programmable permet que le réservoir soit plein en fin de nuit et vide (à une réserve de sécurité près) en fin de journée.

A MAROMME, l'automate gère le pompage d'eau brute ainsi que le poste de réactifs de la station de traitement, de façon que le niveau du réservoir d'eau filtrée suive une consigne représentée par la figure 746.

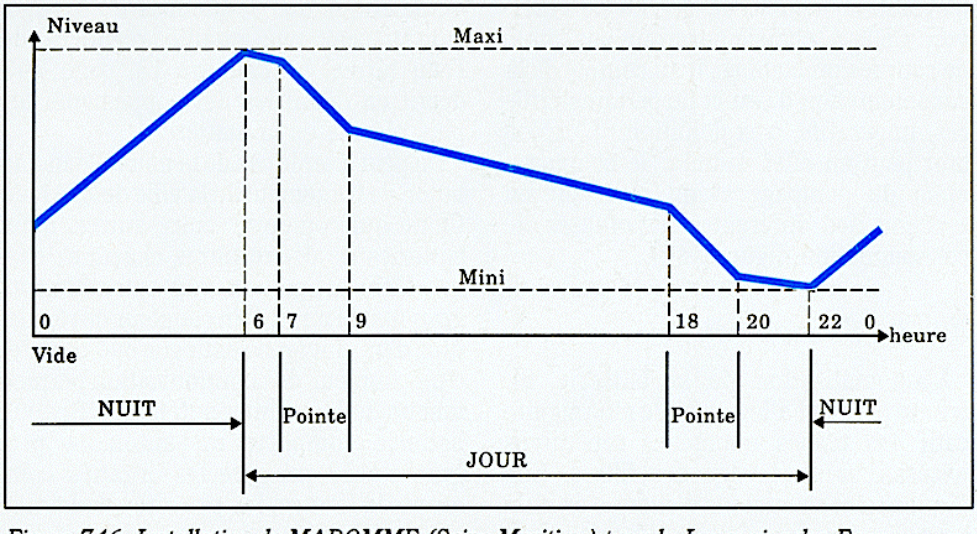


Figure 746. Installation de MAROMME (Seine-Maritime) pour la Lyonnaise des Eaux. Débit: 18 000 $m^3.j^{-1}$. Profil de courbe du réservoir d'eau filtrée de la station.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

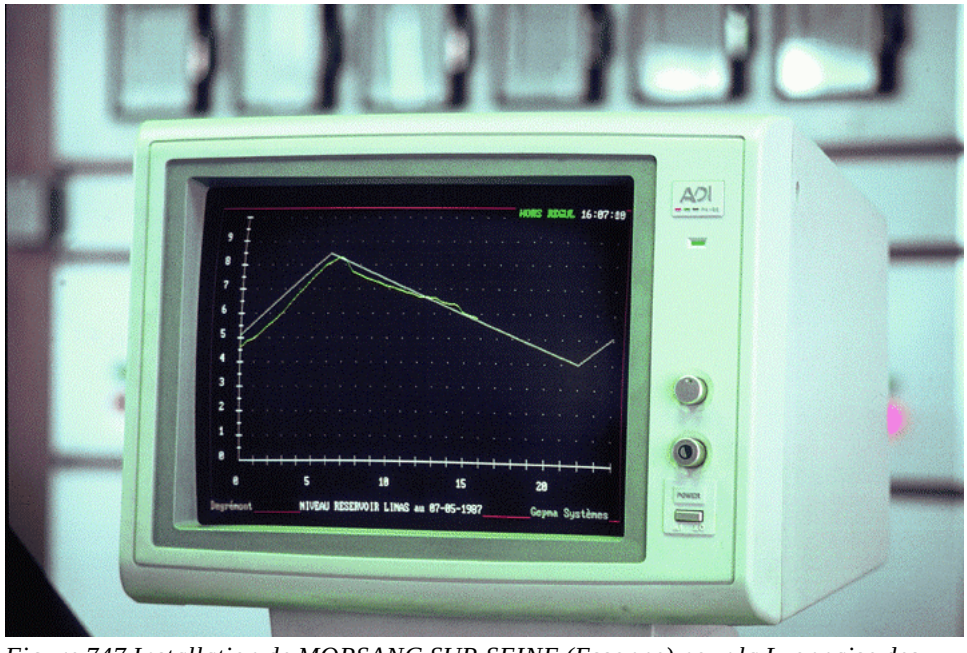


Figure 747 Installation de MORSANG-SUR-SEINE (Essonne) pour la Lyonnaise des Eaux. Courbes d'évolution consigne et réelle du niveau du réservoir.

Dans l'installation LE de MORSANG-SUR-SEINE, l'automate programmable est, de plus, assisté par un micro-ordinateur qui lui permet de suivre une courbe d'évolution modèle de niveau de réservoir. Celle-ci, choisie parmi un ensemble de courbes préétablies, tient compte de la consommation d'eau et de certains critères impératifs d'exploitation. L'exploitant peut en effet, simuler le comportement du pompage et du réservoir en fonction des différentes hypothèses de consommation (figure 747).

3.6.2. Filtration EP

L'automatisation de la batterie filtrante permet l'allègement le plus significatif des tâches manuelles répétitives nécessaires au lavage des filtres. Elle diminue aussi les coûts d'énergie en utilisant au mieux les périodes d'heures creuses. Parallèlement à ces économies, la régulation des filtres avec démarrage lent, le **déclenchement des** lavages en fonction de paramètres mesurés (temps de filtration, colmatage), le déroulement automatique des séquences de lavage, garantissent une qualité régulière de l'eau filtrée. Le chapitre 13, page 798 décrit en détail les développements les plus récents en la matière.

On peut citer le cas de la nouvelle installation de traitement de la ville de XIAN en Chine qui comporte, entre autres, deux batteries de douze filtres chacune; chaque filtre est géré par un automate programmable muni d'un coupleur de régulation, d'un clavier de dialogue opérateur et d'un coupleur de communication permettant un dialogue inter-automates. Chaque batterie comporte un automate programmable qui gère les organes communs de lavage, les priorités de lavage et le dialogue avec un superviseur (figures 748 a et b).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

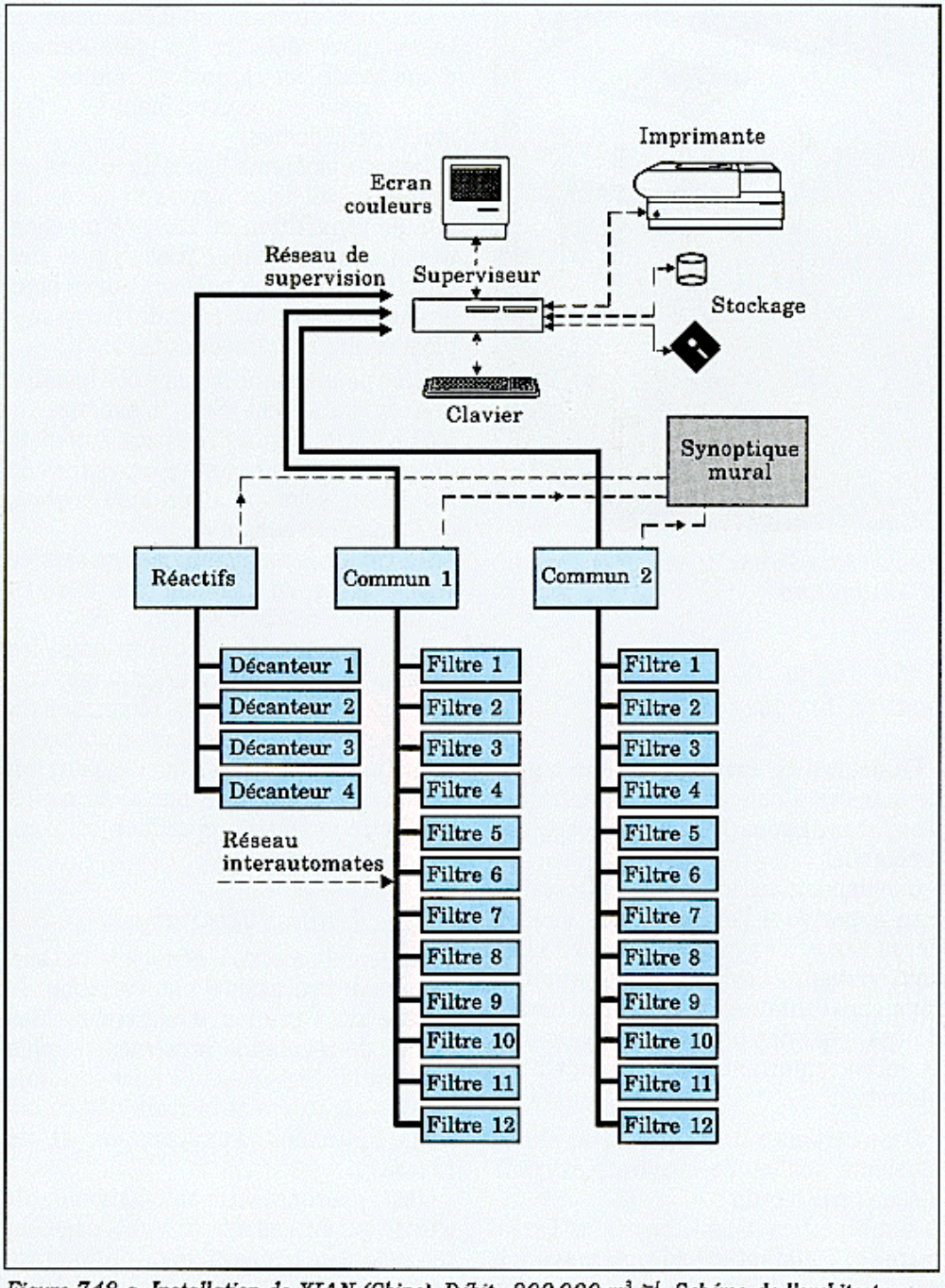


Figure 748 a. Installation de XIAN (Chine). Débit : 800 000 $m^3.j^{-1}$. Schéma de l'architecture générale des automates de la station de traitement d'EP.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 748 b. Pupitre de filtre de la station 1142 de XIAN (Chine).

3.6.3. Répartition d'air entre bassins de boues activées

Le débit d'air insufflé doit être régulé de manière à obtenir une concentration d'oxygène dissous proche d'une consigne préétablie.

Une importance toute particulière doit être apportée à l'entretien des sondes de mesure d'oxygène dissous: elles sont souvent à l'origine de la gestion de plusieurs centaines de kW et une dérive de ces capteurs peut avoir des conséquences importantes sur le coût d'exploitation.

Dans certaines installations, on utilise plusieurs sondes de mesure d'oxygène dissous par bassin

- soit réparties dans le bassin, et l'automate de régulation effectue une **moyenne pondérée** pour intégrer au mieux les besoins globaux du bassin,
- soit concentrées en un même point du bassin pour détecter les **défaillances d'une sonde** par rapport aux autres,
- soit disposées, en combinant les 2 formules précédentes.

Lorsque plusieurs lignes de traitement sont en parallèle, un dispositif de régulation de **répartition de l'air,** en fonction des besoins de chaque bassin, peut être installé, à condition qu'il soit conçu pour ne pas introduire une perte de charge supplémentaire trop importante.

Ainsi pour chaque tranche de l'installation de traitement d'eau résiduaire de VALENTON (figure 749) un automate programmable gère toutes les vannes de régulation, selon un algorithme breveté, de la manière suivante

- les ventelles des soufflantes en service sont réglées en fonction des besoins totaux d'air de l'installation,
- le déséquilibre de débit d'air entre les bassins est réglé en privilégiant toujours l'ouverture de la vanne de répartition du bassin qui en a le plus besoin; un ordre de fermeture partiel n'est donné, pour un bassin qui a trop d'air, que si au moins une autre vanne de répartition est complètement ouverte.

3.6.4. Aération par turbines

L'automatisme des aérateurs de surface peut être assuré par variation de vitesse ou variation d'immersion. Ces modes de régulation présentent le plus souvent l'inconvénient de faire fonctionner les aérateurs en dehors des conditions optimales d'oxygénation et de brassage.

C'est pourquoi cet automatisme est assuré généralement par syncopage, en respectant un temps minimal de fonctionnement continu et un temps maximal d'arrêt pour assurer un brassage suffisant

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

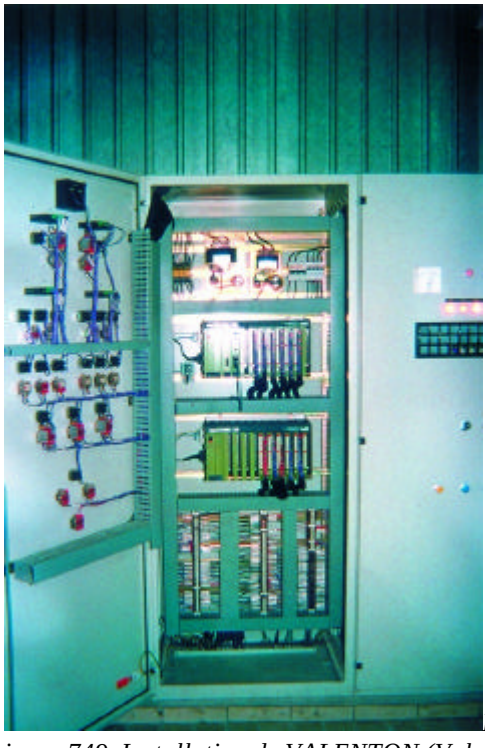


Figure 749. Installation de VALENTON (Val-de-Marne) pour le S.I.A.P.P. Une des soufflantes et l'automate de régulation.

Lorsque le bassin d'aération comporte un nombre élevé d'aérateurs de surface, le fonctionnement simultané de nombreux appareils doit être évité au maximum en période de pointe tarifaire.

Au lieu de multiplier les pistes d'horloge et/ou les oxygènemètres, on peut utiliser un automate programmable dont le programme permet de paramétrer chaque aérateur de surface selon un pourcentage de temps de fonctionnement, variable selon la tranche horaire à partir d'une horloge hebdomadaire, et pouvant être corrigé par la mesure du débit d'eau; l'automate se charge de répartir le fonctionnement des moteurs dans le temps. Un oxygènemètre est utilisé pour asservir une ou deux turbines à titre d'appoint par rapport aux réglages des autres aérateurs. Tout en assurant l'oxygénation nécessaire et un brassage correct, ce système permet de réaliser

- des économies d'énergie par les possibilités qu'il offre dans la finesse des réglages, - des économies sur le contrat d'abonnement d'énergie par la possibilité de répartir les temps de fonctionnement selon les tranches horaires.

Ce dispositif a, par exemple, été installé à la station d'épuration de la communauté urbaine de LILLE à VILLENEUVE-D'ASCQ lors de l'extension de l'installation: un second bassin d'aération, comportant six turbines, géré par un automate spécifique, a permis de faire réaliser des gains d'énergie supérieurs à 20% par rapport à un système antérieur sur horloge simple (figure 750).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 750. Installation de VILLENEUVE-D'ASCQ (Nord). Capacité: 120 000 éq. hab. 1144 Bassin d'aération régulé par API.

3.6.5. Déshydratation de boue par filtre à bandes (SUPERPRESSDEG)

La déshydratation mécanique des boues est généralement la partie d'une installation d'épuration d'eau usée qui demande le plus de présence pour son exploitation. L'automatisation de ce poste peut permettre, soit de libérer du personnel de surveillance pour accomplir d'autres tâches, soit d'autoriser un fonctionnement du poste sur des plages horaires plus étendues.

C'est l'objectif poursuivi pour l'automate de régulation du SUPERPRESS.

Une première version, utilisant un petit automate, réalise les automatismes séquentiels de mise en marche et d'arrêt du poste de déshydratation ainsi que l'interface opérateur avec un clavier intelligent. Les anomalies peuvent aussi être signalées à l'exploitant là où il se trouve, sur Minitel par un AQUAVEIL qui lui permet également d'effectuer les démarrages et arrêts à distance (voir page 1150).

Une seconde version "régulée" est particulièrement destinée aux installations dont la qualité de la boue peut varier, entraînant alors des risques de mauvaise floculation ou de fluage.

En plus des fonctions décrites précédemment, l'automate programmable peut détecter des perturbations particulières grâce à des capteurs spécifiques complémentaires (fluage, accumulation ou manque de boue). Par un coupleur de régulation, il réagit à ces perturbations en modifiant la vitesse de la pompe à boue ou de la pompe à polymère.

L'installation de TARBES, par exemple, dispose de deux SUPERPRESS ; chacun d'eux est géré par un automate spécifique muni de son clavier de dialogue opérateur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

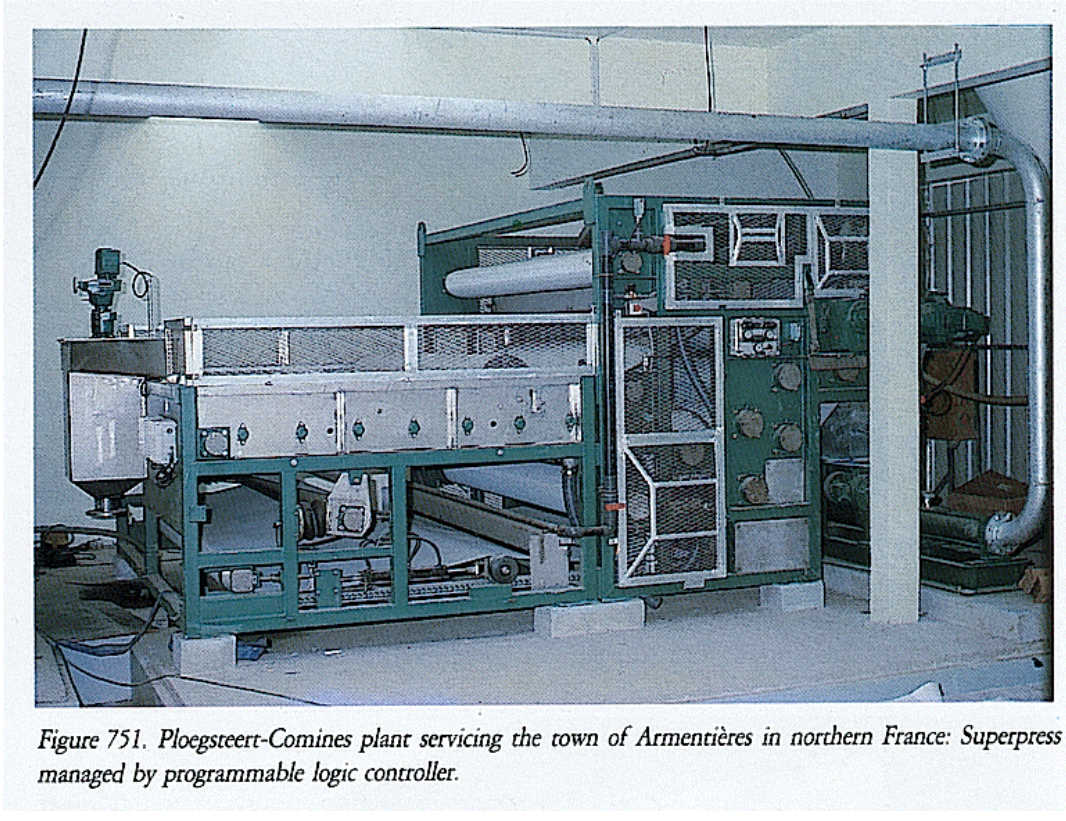


Figure 751. Ploegsteert-Comines plant servicing the town of Armentières in northern France: Superpress managed by programmable logic controller.

Figure 751. Installation de PLOEGSTEERT-COMINES (Nord) pour la ville d'ARMENTIÈRES. SUPERPRESS géré par automate.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. LA SUPERVISION

4.1. LES INTERFACES OPÉRATEURS

Comme indiqué en page 1114, dans un système automatisé, la partie commande fournit des comptes rendus à l'opérateur qui lui-même envoie des consignes à la partie commande.

La supervision d'une installation consiste à réaliser cette "boucle" qui passe par l'opérateur.

. D'une manière classique, en technologie câblée, les consignes de l'opérateur sont transmises au système automatisé par l'intermédiaire de commutateurs et de boutons-poussoirs pour les ordres TOR, et par potentiomètres pour les valeurs de consigne; les comptes rendus sont fournis à l'opérateur, par des indicateurs et enregistreurs pour les valeurs de mesure, et par des voyants lumineux, boîtiers multicases et avertisseurs sonores pour les informations TOR. A partir d'une taille moyenne d'installation, il est intéressant de regrouper les voyants à des emplacements judicieusement choisis sur un tableau synoptique représentant schématiquement l'installation (figure 752).

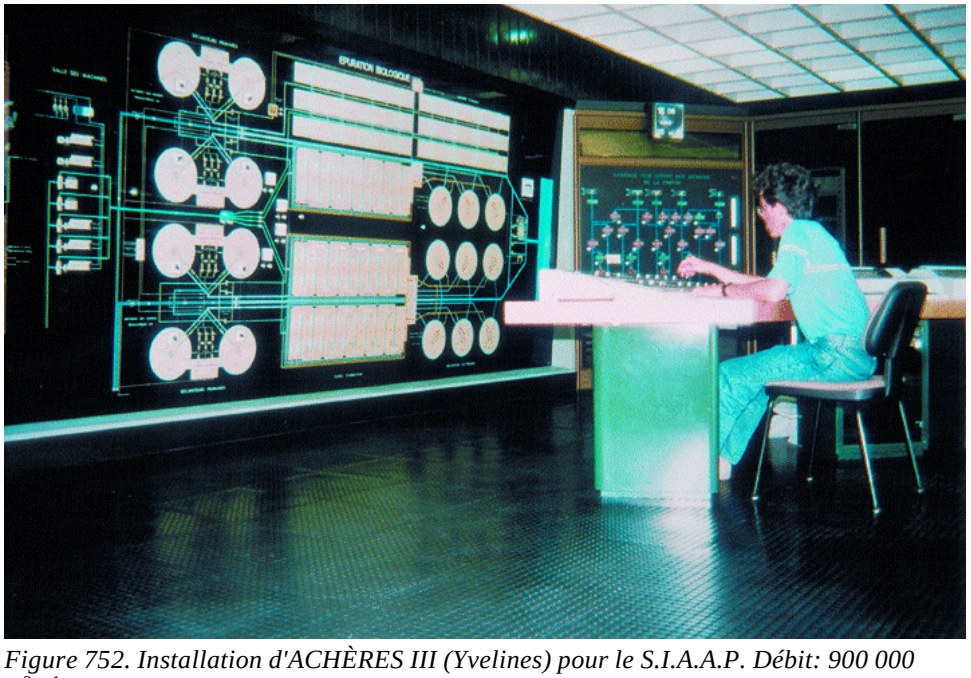


Figure 752. Installation d'ACHÈRES III (Yvelines) pour le S.I.A.A.P. Débit: 900 000 $m^3.j^{-1}$ Pupitre et synoptique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

. Cette conception classique présente cependant deux inconvénients: celui de prendre beaucoup de place en surface d'un mur ou d'un pupitre de commande et celui d'être figée: les modifications nécessitent souvent de gros travaux de tôlerie, recâblage, aménagement du synotique, etc.

L'utilisation des pupitres opérateurs programmables permet maintenant de pallier ces difficultés: les comptes rendus apparaissent sous forme d'un texte préenregistré (16 caractères ou plus) et les consignes de l'opérateur sont établies sur un clavier compact dont les touches sont programmables.

Associé à un automate programmable, un pupitre opérateur dit "intelligent" (figure 753) permet également de modifier les paramètres d'exploitation tels que valeurs de temporisation, consignes de régulation, etc., et d'assurer une aide au dépannage, par le fait qu'il peut afficher un grand nombre de textes différents selon le défaut détecté par l'automate sans augmentation de matériel: les textes affichés sont en effet programmables et il est possible à (exploitant d'enrichir le système, en fonction de sa propre expérience.

Les pupitres opérateurs intelligents sont cependant limités aux petites installations ou au contrôle local de parties d'installations. . Pour la supervision centralisée d'installations plus importantes, les interfaces opérateurs sont de plus en plus des équipements péri-informatiques, tels que clavier, console de visualisation et imprimante permettant de profiter pleinement des moyens informatiques actuels. La figure 754 représente un modèle de système automatisé avec la fonction de supervision disposant d'équipements péri-informatiques.

L'acquisition de données est la fonction qui relie la partie commande à la fonction supervision.

Figure 753. Installation de MORSANG. Plastron

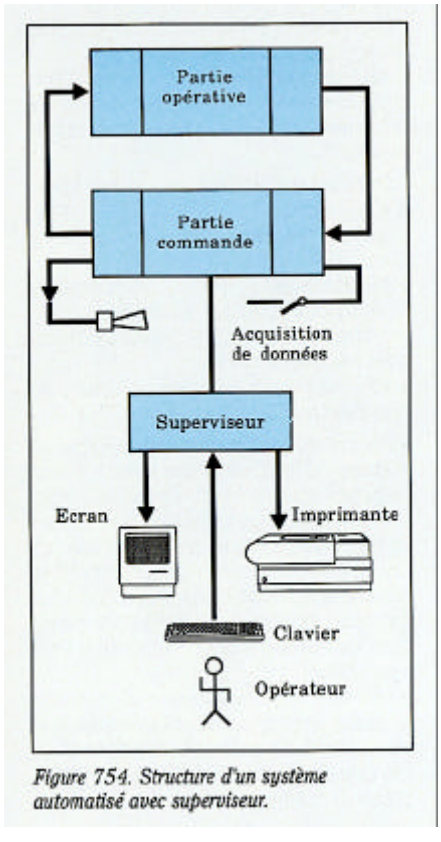


Figure 754. Structure d'un système automatisé avec superviseur.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2. L'ACQUISITION DES DONNÉES

Elle consiste à réaliser la liaison entre la partie commande d'une installation et la partie supervision dans le cas où il ne s'agit pas d'une simple liaison de type "fil à fil".

. L'ensemble des informations échangées circule sur un support commun de transmission.

Dans le sens superviseur vers procédé, il s'agit principalement de:

- **télécommandes** pour les ordres TOR,
- **téléconsignes** pour les consignes transmises sous forme de valeurs numériques.

Dans le sens procédé vers supervision, il s'agit de:

- **télésignalisation** pour les informations TOR à caractère normal,
- **téléalarmes** pour les informations TOR représentant des anomalies,
- télémesures pour des valeurs numériques ou analogiques,
- **télécomptages** pour les informations représentant des totalisations.

. Pour réaliser cette transmission d'informations à l'intérieur d'une usine on peut employer plusieurs techniques courantes:

- le multiplexage, technique qui permet de transmettre des informations avec un nombre de conducteurs réduit, est utilisé pour de très petites configurations et pour raccorder des interfaces opérateurs classiques (par exemple pour l'animation d'un synoptique),
- les centrales d'acquisition de données si une grande quantité de mesures doit être centralisée sans autre traitement, ce qui est relativement rare dans une installation de traitement d'eau,
- les cartes électroniques d'entrées-sorties d'ordinateurs, si le superviseur est bâti autour d'un calculateur et qu'il n'y a pas d'automatisme à réaliser sur l'installation, ce qui là encore est rare dans une installation de traitement d'eau moderne,
- l'utilisation des automates programmables qui tend à se généraliser pour effectuer facilement la connexion entre la partie commande et la fonction supervision à l'intérieur d'un même site, pourvu que les API choisis soient équipés d'une fonction de communication standard.

. Le problème se pose différemment lorsqu'il s'agit de télétransmissions entre plusieurs sites éloignés: le choix du mode de transmission peut se porter sur l'un des quatre supports suivants, parmi les plus utilisés:

- la liaison privée par fils ou fibre optique entre les sites,
- la ligne téléphonique louée à l'Administration des Télécommunications permettant une communication permanente,
- la ligne téléphonique du réseau autocommuté, très pratique d'utilisation, pour des transmissions à distance d'informations de courte durée et peu fréquentes. Ce moyen de communication est couramment utilisé pour la transmission d'alarmes (appels à distance d'un agent d'astreinte), ou l'acquisition automatique périodique de données élaborées localement (par exemple relevés de compteurs), - la transmission radio, très utile pour certains sites isolés, mais qui nécessite toujours le respect d'une réglementation rigoureuse pour l'utilisation des ondes hertziennes.

Le matériel utilisé pour transmettre des informations sur ces supports est généralement du matériel spécialisé à cette fonction, ou des automates programmables dotés d'équipements additionnels adéquats (figure 755).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

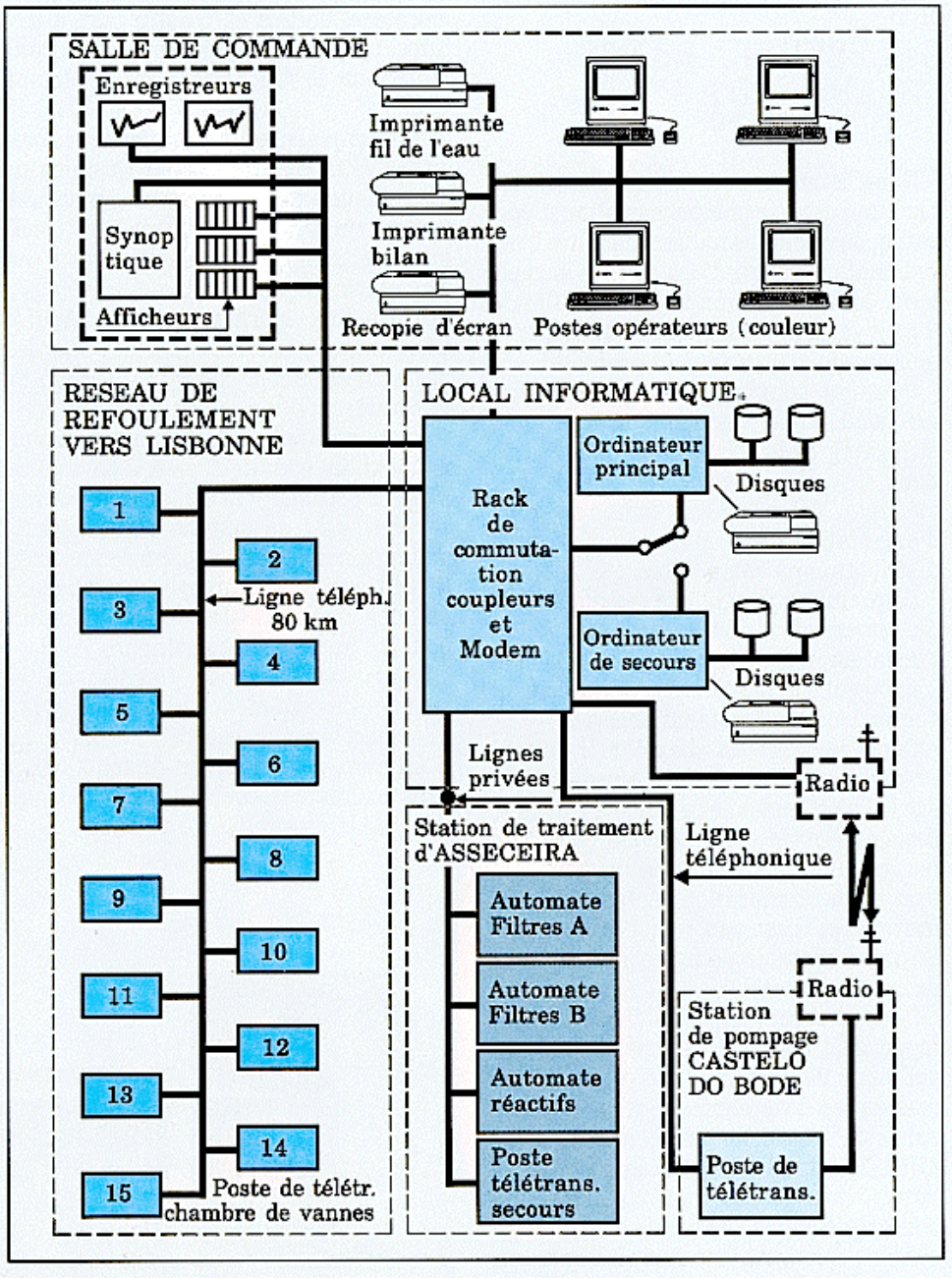


Figure 755. Installation de LISBONNE (Portugal). Traitement d'eau potable. Architecture générale du système de contrôle-commande de l'usine.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.3. TÉLÉSURVEILLANCE ET APPEL D'AGENT D'ASTREINTE

Dans le cas de petites installations telles que poste de pompage, station d'épuration de quelques milliers d'équivalents habitants, château d'eau, etc., la surveillance humaine continue ou l'installation d'un système informatique de supervision locale sont d'un coût prohibitif.

Pourtant, dans ces petites installations, des incidents de fonctionnement peuvent être très graves s'ils ne sont pas réparés dans les plus brefs délais comme, par exemple, débordement, perte de boue d'une station d'épuration, coupure de la distribution en eau potable, etc.

La première fonction de ces dispositifs de supervision doit être de surveiller l'installation et de faire appel rapidement à un agent d'exploitation en lui décrivant sommairement l'incident observé.

Certaines sociétés d'exploitation sont organisées de manière à effectuer une surveillance humaine continue 24 h/24 h, dans un poste central souvent équipé de moyens informatiques relativement coûteux: cette organisation nécessite de gros moyens et n'est pas toujours économiquement rentable pour des installations de taille modeste.

C'est pourquoi, DEGRÉMONT a développé AQUAVEIL, système de télésurveillance de coût modeste, utilisant les ressources de la télématique, et en particulier le téléphone autocommuté et le MINITEL standard, qu'un agent d'exploitation peut avoir dans son bureau et à son domicile. Chaque site (poste de pompage, château d'eau, etc.) est équipé d'un transmetteur local programmable et intelligent raccordé, d'une part, à l'installation par des entrées et sorties et, d'autre part, à une prise téléphonique du réseau autocommuté dont le fonctionnement est le suivant:

- en permanence, le transmetteur local AQUAVEIL exécute son programme de surveillance, par exemple: comptabilisation de temps de marche, comptage d'événements, comparaison de mesures à des seuils, etc., (figure 756),
- lorsqu'une alarme survient, AQUAVEIL appelle automatiquement l'un des numéros de téléphone qu'il possède en mémoire,
- après un appel automatique ou à tout moment, un opérateur peut, à l'aide d'un MINITEL, consulter l'état des entrées raccordées: état de marche des différents moteurs, compteurs, valeurs de mesures. Il peut également envoyer des télécommandes ou même laisser un message pour un autre opérateur (figure 757).

La puissance et la fiabilité de ce système de coût modeste tiennent au fait que l'intelligence est décentralisée au maximum, ce qui permet de fonctionner sans ordinateur central pour ces fonctions de télésurveillance de base.

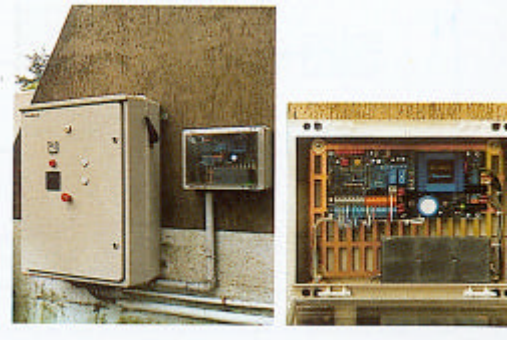


Figure 756. Aquaveil I.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ce système peut être complété, sur un ou plusieurs sites privilégiés, d'un transmetteur central programmable permettant de consigner des informations, de réaliser des appels de routine pour relever des informations à heure fixe, ou de relier le réseau ainsi constitué à un micro-ordinateur qui a en charge de mémoriser les événements, d'étudier les statistiques de fonctionnement, etc. (figure 758).

En dehors des cas de petites installations, on a généralement recours à un système informatique de supervision.

Figure 757. AQUAVEIL. Opérateur devant un MINITEL

Figure 758. AQUAVEIL II.

4.4. SUPERVISION PAR ORDINATEUR ou GESTION TECHNIQUE CENTRALISÉE (GTC)

Un système de GTC a deux rôles principaux:

- faciliter l'exploitation de l'usine en rassemblant en un même lieu (salle de commande) toutes les informations utiles à l'exploitant (télésignalisations, téléalarmes, télémesures) et en lui permettant depuis ce même lieu d'agir sur la partie commande (télécommandes et **téléréglages).** Ces fonctions doivent s'exécuter en **temps** réel,
- permettre une analyse du fonctionnement de l'usine en vue de tendre vers son exploitation optimale. Ces fonctions s'exécutent en temps différé.

. Fonctions temps réel

La notion de temps réel est ici relative à un temps de réaction humaine, c'est-à-dire de l'ordre de quelques secondes, voire même quelques minutes dans certains cas de communication à distance.

Le système de GTC dans sa fonction conduite et surveillance temps réel doit permettre de

- **communiquer** avec les éléments réalisant la partie commande,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- constituer une base de données, véritable image de l'installation,
- trier les informations obtenues,
- mettre à la disposition de l'opérateur les informations significatives,
- permettre à l'opérateur de fournir des ordres et consignes à la partie commande (facultatif.

Le matériel utilisé est constitué d'une unité centrale (mirai ou micro-ordinateur ou automate programmable haut de gamme pour de petites configurations) dans laquelle se situe la base **de données** et qui gère les périphériques de communication homme - machine: **console de visualisation et imprimante.**

L'imprimante consigne les événements au fur et à mesure qu'ils apparaissent.

La console de visualisation peut pré semer les informations sous forme alphanumérique mais, pour améliorer l'ergonomie du poste de travail de l'opérateur, on utilise souvent des représentations schématiques sur un écran couleur (synoptique sur visu graphique ou semi-graphique) (figure 759).

Certains systèmes sont munis également d'un appeleur automatique de l'agent d'astreinte pour les cas d'alarme importante.

. Fonctions temps différé

L'adjonction d'une mémoire de masse complémentaire permet de mémoriser des informations en vue d'une exploitation a posteriori.

On peut ainsi constituer

- des bilans d'exploitation (journaliers, hebdomadaires ou mensuels) dans lesquels sont présentés les moyennes ou totalisations des mesures les plus significatives, les cumuls de temps de marche pour l'aide aux opérations d'entretien, etc., - des courbes de valeur de mesure permettant de visualiser sur une console graphique l'évolution de paramètres significatifs (figure 760),
- un archivage d'informations sur support magnétique permettant d'effectuer des analyses statistiques (généralement exécutées sur des micro-ordinateurs différents).

. **Logiciels**

Une attention particulière doit être apportée aux logiciels implantés dans

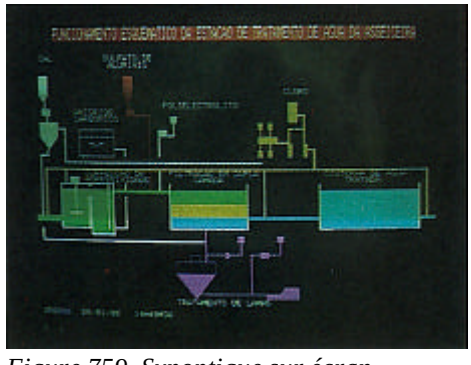


Figure 759. Synoptique sur écran.

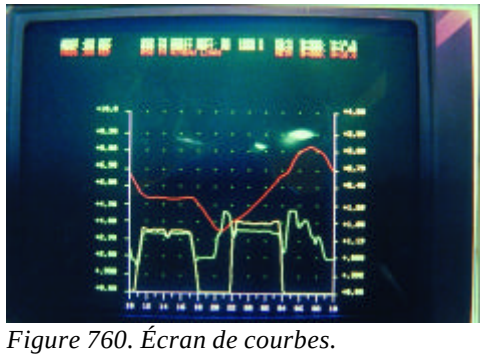


Figure 760. Écran de courbes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

l'unité centrale qui sont caractérisés par les fonctionnalités offertes.

Les logiciels standard sont à préférer aux programmes écrits spécifiquement pour l'installation, qui sont longs à mettre au point. On doit attacher une attention particulière aux éléments suivants:

- accessibilité des dialogues opérateurs à des non-spécialistes,
- manipulation aisée de l'outil de dialogue (stylo optique, souris, écran tactile, etc.),
- vitesse d'affichage à l'écran.

Le logiciel SUPERVEIL, qui peut être utilisé en monoposte ou en multiposte est un logiciel standard paramétrable qui a été développé en tenant compte de ces critères (figure 761).

Figure 761. Conduite d'installation par stylo optique. SUPERVEIL.

4.5. AIDE A LA DÉCISION

Les systèmes d'automatisme et de supervision déchargent l'agent d'exploitation des tâches routinières ou fastidieuses, en lui laissant la responsabilité des tâches nobles ou exceptionnelles pour lesquelles il peut être assisté d'un système d'aide à la décision.

On peut classer de tels systèmes en deux catégories

- ceux qui se rapportent à la maintenance, qu'elle soit curative ou préventive, - ceux qui se rapportent à la conduite d'une installation en vue de son optimisation.

Des progrès très rapides sont à prévoir dans ce domaine. Quelques exemples d'application sont cités ci-après.

4.5.1. Aide à la maintenance

Des dispositifs d'aide au dépannage peuvent être prévus au niveau de l'automatisme en utilisant la puissance des automates programmables, pour réaliser par exemple des contrôles de discordance, des détections d'anomalies par rapport à un fonctionnement habituel préprogrammé, etc. Les pupitres opérateurs programmables permettent par exemple d'afficher, pour l'opérateur qui vient d'être appelé, des messages d'aide au dépannage qui précisent l'origine de l'anomalie.

La fonction de supervision (page 1151) fournit fréquemment des informations utiles pour l'aide à la maintenance pré**ventive** par exemple, en calculant des temps de marche de moteurs, en interprétant des dérives de courbes de mesure pour demander un réétalonnage de capteur, etc.

Le coût raisonnable de micro-ordinateurs possédant de grosses capacités mémoire permet maintenant l'assistance de l'informatique, pour la conservation et la recherche de fichiers, (de matériels, de fournisseurs, de notices, etc.), l'établisse-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ment de calendriers de visite et d'entretien, l'aide au diagnostic, etc. C'est la MAO (maintenance assistée par ordinateur).

4.5.2. Aide à la conduite

L'utilisation de la puissance de plus en plus performante de l'informatique permet de réaliser des aides à la conduite en effectuant des calculs de **simulation, à partir** de modèles mathématiques soit préétablis, soit calculés à partir de paramètres observés (modèles stochastiques).

Ces logiciels de simulation sont longs et coûteux à adapter à une installation de traitement d'eau complexe. C'est pourquoi on les rencontres surtout pour modéliser des phénomènes purement hydrauliques (réseau, pompage). Leur utilisation dans la conduite des processus épuratoires est encore freinée par la fiabilité et le coût d'un certain nombre de capteurs.

4.5.3. Systèmes experts

Un système expert est un logiciel d'intelligence artificielle utilisant des programmes d'ordinateur qui imitent l'intelligence humaine et intègrent l'expertise humaine existant dans le problème à résoudre. Un système expert est capable de capitaliser les connaissances d'un expert humain d'un domaine précis ainsi que ses modes de raisonnement afin d'aboutir aux mêmes conclusions à partir d'un ensemble d'observations.

Schématiquement, la structure d'un système expert est composée des trois parties suivantes (figure 762)

- la base de connaissances qui contient l'ensemble du savoir d'un expert humain, - la base de faits qui contient (ensemble des informations relatives au problème posé,
- le moteur d'inférence qui applique les règles de raisonnement pour trouver la solution.

Des logiciels annexes d'interface permettent une facilité d'accès de l'utilisateur.

Dans une installation de traitement d'eau, on peut prévoir des systèmes experts, principalement dans les domaines où le spécialiste capable d'interpréter des faits ou des paramètres n'est pas disponible en permanence. Ce peut être le cas des opérations relatives à la supervision ou la conduite d'installation, au diagnostic d'aléas de fonctionnement, aux opérations de maintenance (MAO), à la formation des opérateurs, etc.

Certains systèmes experts sont connectés à l'installation pour acquérir des informations indépendamment de l'opérateur. Le pilotage direct peut être prévu après validation par un opérateur.

Un système expert, bâti pour une installation particulière intègre, l'expertise et les observations habituelles du personnel d'exploitation connaissant le mieux l'installation. Cependant, les considérations économiques limitent généralement cette technique à de grosses installations ou à des problèmes complexes ne pouvant pas être résolus autrement.

Par exemple, le système expert, utilisé par la Lyonnaise des Eaux pour l'exploitation de la nappe d'AUBERGENVILLE optimise la sélection et le temps d'utilisation des forages, non seulement sur des critères économiques, mais surtout sur des critères de qualité d'eau relatifs au traitement d'élimination de l'azote.

Cependant, pour permettre d'assister le plus grand nombre d'exploitants d'usines, DEGRÉMONT développe une famille de modules de systèmes experts d'aide au diagnostic et à la décision dénommée EXPERTVEIL qui fonctionne sur micro-ordinateur standard. L'expertise y est structurée comme suit

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

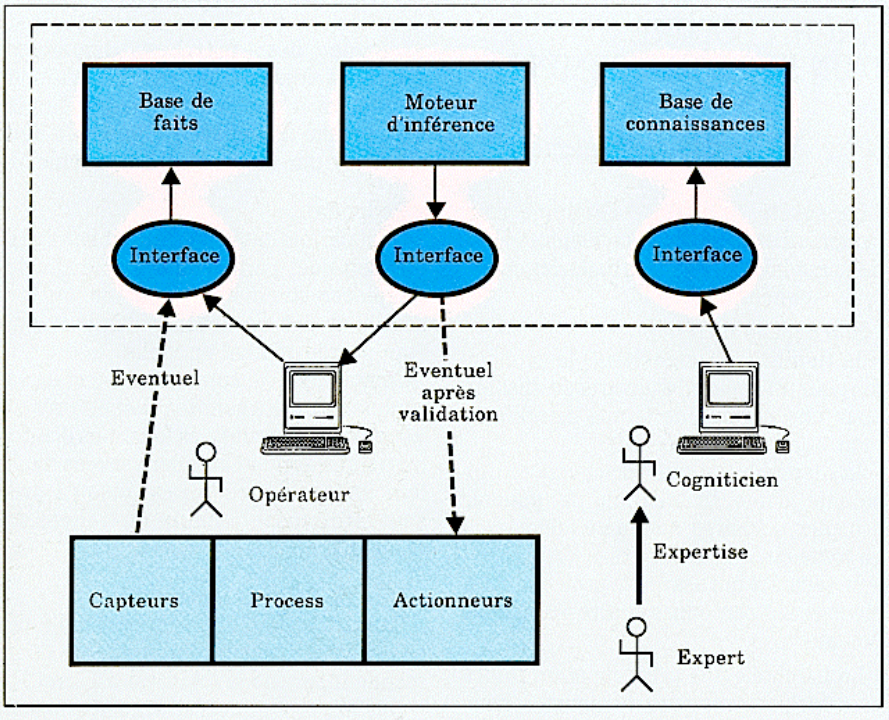


Figure 762. Schéma simplifié de fonctionnement et d'utilisation d'un système expert.

- la progression part des informations connues ou faciles à acquérir (observations visuelles, tests simples...),
- certaines informations peuvent être omises et/ou sont calculées automatiquement, si possible, par le système,
- les informations complexes (résultats analytiques...) ne sont exigées qu'en cas d'absolue nécessité.

Exemples de modules EXPERTVEIL

PERTES DE BOUES

Ce système vise à analyser, diagnostiquer et combattre les pertes de boues activées et les incidents de clarification sur les stations d'épuration biologique.

Il prend en compte les caractéristiques techniques et dimensionnelles des ouvrages et des équipements du bassin d'aération, du clarificateur et de la recirculation de boues ainsi que les données analytiques et autres tests courants.

SUPERPRESSDEG

Ce système constitue une aide à la conduite et à l'optimisation des performances d'un atelier de déshydratation de boues par filtre à bandes.

I1 permet de localiser et de remédier aux incidents mécaniques ou aux pertes d'efficacité mais aussi de trouver le réglage optimal en fonction de l'objectif assigné par l'utilisateur (siccité, débit massique...).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.6. ARCHITECTURE D'UN SYSTÈME COMPLET

4.6.1. Sûreté de fonctionnement

La sûreté caractérise l'aptitude d'un système à exécuter correctement les fonctions qui lui sont confiées dans des conditions données.

Elle dépend de:

- la **fiabilité** qui caractérise la probabilité pour un appareil d'assurer sa mission pour une période de temps déterminée (voir norme NF X 06-501),
- la disponibilité qui caractérise la probabilité d'une installation de pouvoir accepter la charge nominale (débit, etc.) en toute circonstance,
- la sécurité qui assure la protection des biens et des personnes contre les risques potentiels.

La fiabilité est la préoccupation principale des constructeurs de matériel, mais le concepteur ne peut pas agir sur cette composante. Il faut néanmoins savoir que les pannes de matériel électronique sont plus fréquentes dans les premiers mois d'utilisation qu'après.

Bien que les systèmes de commande atteignent maintenant des degrés de plus en plus élevés de fiabilité (un API est plus fiable qu'un ensemble à relais équivalent), aucun constructeur ne peut garantir qu'aucune panne n'intervienne, au cours de toute la vie d'un automatisme.

La partie commande doit pouvoir être arrêtée (par exemple pour maintenance ou modification) sans pour autant arrêter la partie opérative (impossibilité d'arrêter le traitement de l'eau à certaines périodes).

4.6.2. Marches dégradées

L'étude des marches dégradées consiste à étudier comment l'installation continuera à fonctionner malgré l'arrêt d'un organe de la partie commande afin d'assurer une disponibilité maximale.

. Redondance

Il est parfois envisagé de doubler ou tripler certaines parties du système afin de remplacer automatiquement un organe défaillant par un second identique qui était précédemment en veille.

Compte tenu de son coût élevé et de sa complexité, cette solution doit être réservée aux cas où toutes les fonctions d'automatismes doivent être conservées dans leur intégralité, ce qui est jusqu'à présent rare dans le domaine du traitement des eaux.

. Marche dégradée manuelle

Dans les installations de petite taille, on envisage souvent la possibilité de commande manuelle si l'API est à l'arrêt.

Ceci nécessite impérativement que toutes les informations utiles à la marche manuelle soient disponibles même si l'API est à l'arrêt (par exemple le traitement des défauts).

Ce dispositif ne peut cependant être envisagé que si la reprise manuelle s'effectue depuis un seul lieu géographique et ne concerne qu'un nombre limité d'organes et d'automatismes simples (à l'exclusion d'organes réglés en permanence).

. Décentralisation des automatismes

Dans le cas où l'une des conditions précédentes n'est pas satisfaite, il faut envisager de répartir les automatismes dans plusieurs API décentralisés près du procédé de manière à ce que la reprise manuelle d'un API reste humainement possible.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les API, maintenant de plus en plus miniaturisés, disposent de possibilités de communication réservées autrefois aux appareils de haut de gamme et facilitent cette décentralisation.

Le découpage fonctionnel et géographique de la partie commande peut faire évoluer l'étude des marches dégradées dans trois directions possibles à étudier automate par automate:

- la redondance pour une partie vitale de l'installation,
- la reprise manuelle par relayage hors automate (figures 763 et 764),
- l'abandon pur et simple de la partie du procédé concernée (par exemple cas de machines parallèles), les marches manuelles pouvant alors être intégrées dans l'automate (figure 765).

Au moment de la conception d'un système décentralisé, il faut étudier avec soin le "découpage" des équipements de traitement (partie opérative), parfaitement identifier ce qui doit constituer un ensemble fonctionnel et définir avec soin la hiérarchisation des différents organes.

Par ailleurs ce découpage fonctionnel permet au concepteur de mettre en œuvre des standards déjà éprouvés sur d'autres installations et donc de réduire les temps de mise au point.

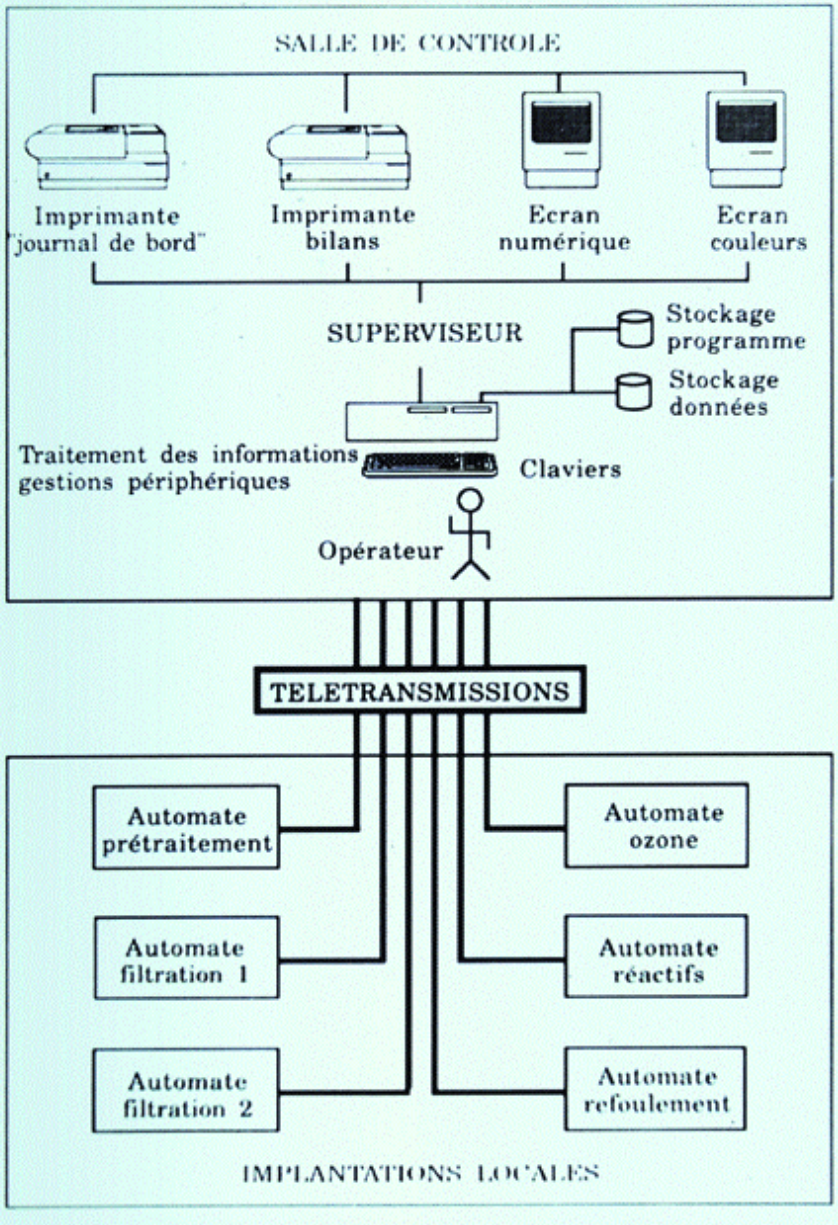
Les dispositifs de sécurité seront toujours traités par une logique câblée et non par un API (recommandation de l'Institut National sur la Sécurité).

4.6.3. Hiérarchisation

La structure de la partie commande d'une usine de traitement d'eau peut se décrire en représentant plusieurs niveaux hiérarchiques: chaque niveau fournissant des ordres au niveau immédiatement inférieur et recevant des comptes rendus de celui-ci (figure 766).

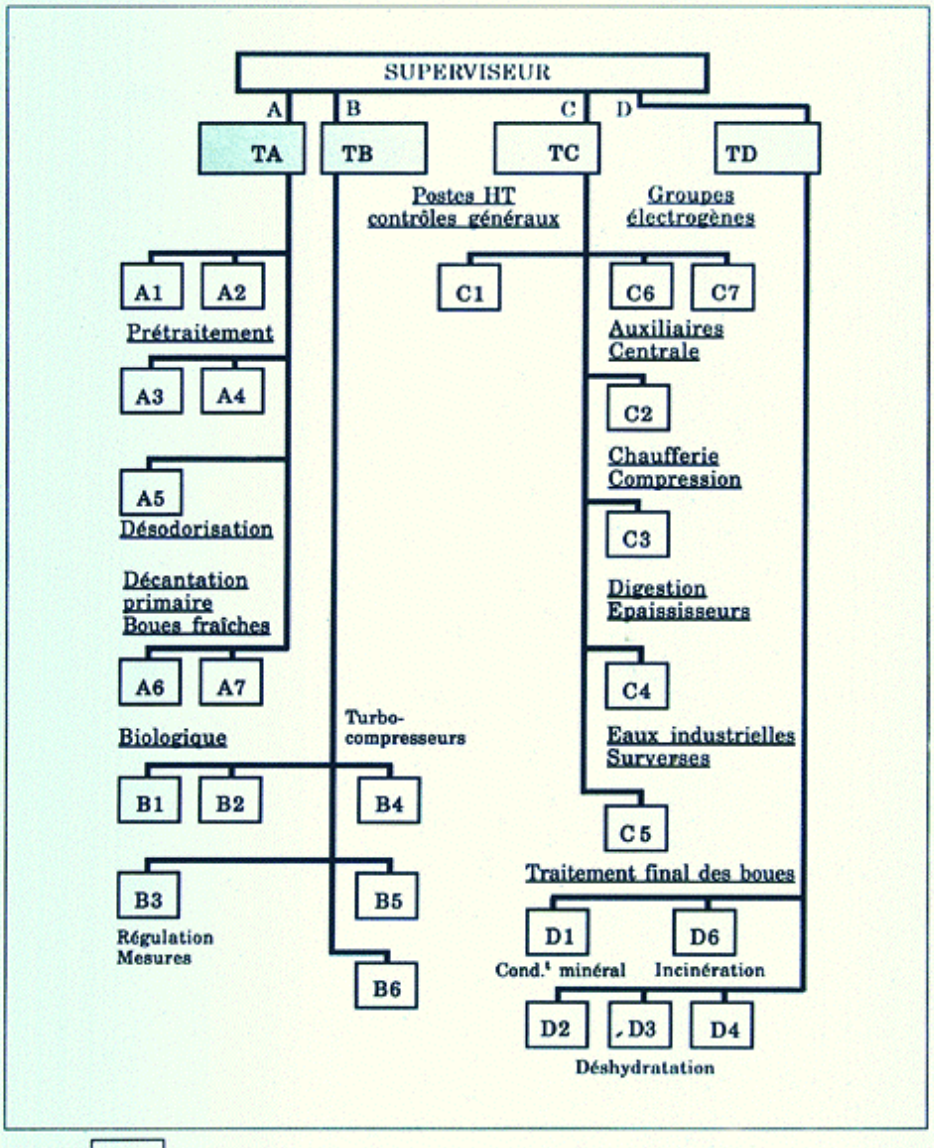
- **le niveau 1** correspond à la commande manuelle directe, mécanique ou hydraulique, des organes,
- **le niveau 2** correspond au domaine de l'instrumentation, avec les actionneurs et les capteurs,
- **le niveau 3** correspond à tous les automatismes et régulations et peut se décomposer hiérarchiquement en
    - 3a. automatismes simples et répétitifs, boucles de régulation rapide, commandes manuelles et traitements de défaut: c'est à ce niveau que sont utilisés les relayages,
    - 3b. automatismes et régulations programmés,
- **le niveau 4** correspond au système de GTC dans dans sa fonction temps réel, c'est-à-dire la supervision,
- **le niveau 5** correspond au système de GTC dans sa fonction temps différé.
- **le niveau 6** est relatif à l'aide à la décision et à l'optimisation des procédés.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



Installation de MORSANG SUR SEINE (Essonne) pour la Lyonnaise des Eaux
Exemple de découpage fonctionnel d'une installation de traitement d'eau potable
Marche dégradée par reprise manuelle locale

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



Légende Automate programmable.

Automate frontal.

Installation de VALENTON (Val-de-Marne) pour le SIAPP. Exemple de découpage fonctionnel d'une installation de traitement d'eau résiduaire urbaine. Marche dégradée par reprise manuelle locale.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

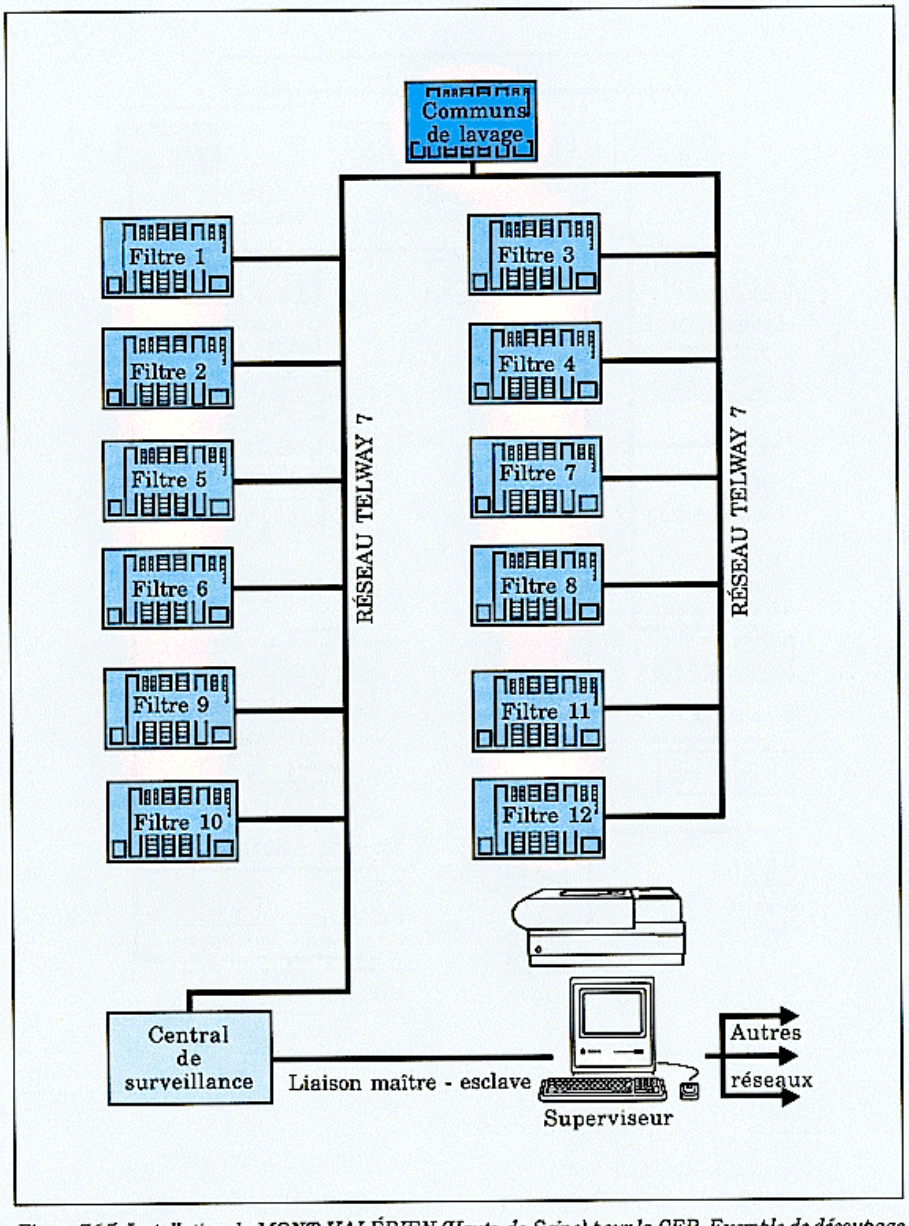
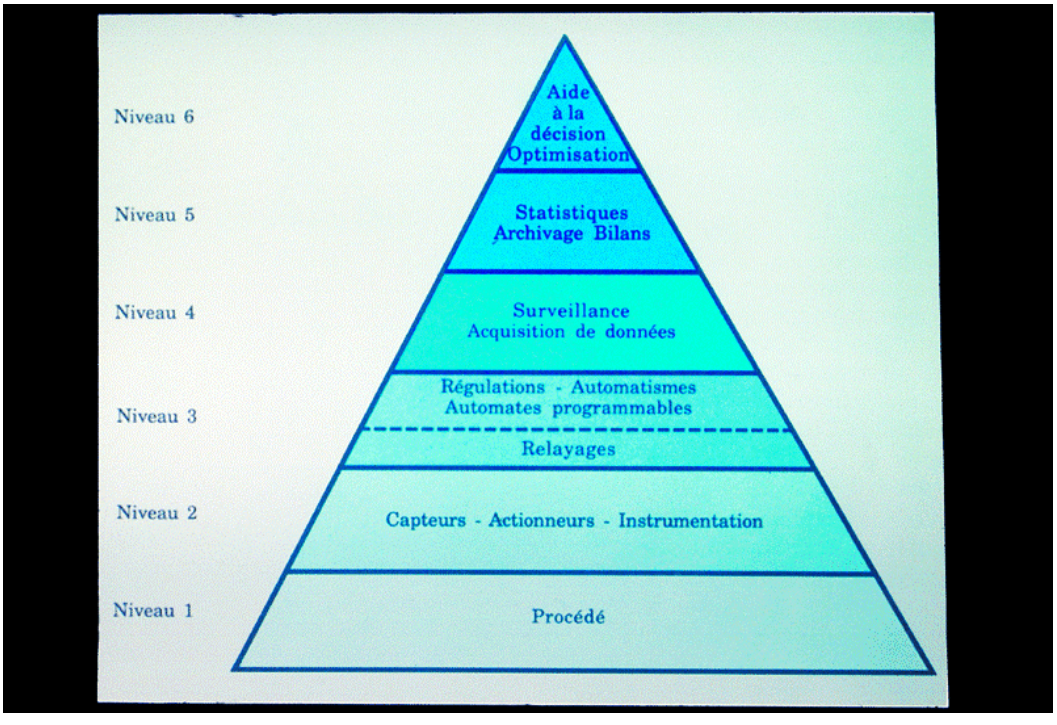


Figure 765. Installation du MONT-VALÉRIEN (Hauts-de-Seine) pour la CEB. Exemple de découpage d'une installation de filtration d'EP. Marche dégradée prévue avec abandon de fonction.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



4. 7.

LES RÉSEAUX DE COMMUNICATION

D'un point de vue fonctionnel, on peut distinguer différents types de réseaux dont les domaines d'application sont bien spécifiques

a) les **réseaux "de terrain"** qui transmettent les données acquises par les capteurs et les ordres envoyés aux actionneurs ou permettent de déporter des cartes d'E/S d'automates programmables. Ces réseaux sont destinés à réduire les câblages et doivent être insensibles aux perturbations industrielles (parasites). Ils transitent un petit nombre d'informations en un temps limité.

b) les **réseaux de coordination** inter-automates qui transmettent des requêtes et comptes rendus. Ces réseaux doivent être insensibles aux perturbations industrielles et pouvoir garantir un transfert en temps limité.

c) les **réseaux de supervision** qui transmettent des informations d'acquisition de données en échangeant des informa

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tions entre un superviseur central et des satellites locaux (voir page 1148).

d) les réseaux de gestion technique qui échangent un grand nombre d'informations par fichiers.

e) les réseaux de bureautique dont l'usage est très peu fréquent dans une installation de traitement d'eau.

D'un point de vue matériel, les **supports de transmission** (appelés également médias ou voies de communication) sont souvent constitués de paires torsadées. On utilise parfois des câbles coaxiaux qui permettent des débits de transmission plus élevés ou des fibres optiques insensibles aux parasites puisque le signal est transmis sous forme lumineuse et non pas électrique.

Ces deux derniers supports sont cependant d'un coût plus élevé.

Le mode de liaison des différentes stations (appareils émettant ou recevant des informations sur un support de transmission) définit la topologie du réseau dont les plus courantes sont les suivantes (figure 767)

1 - La liaison point à point: deux stations échangent directement des informations entre elles et ne sont raccordées à aucune autre.

2 - Le réseau en étoile: les stations satellites sont toutes reliées à une station centrale. Les supports de transmission se comportent comme des liaisons point à point.

3 - Le réseau en boucle: des liaisons point à point relient successivement une station à une autre, la dernière étant connectée à la première. Un mécanisme de contournement d'une station à l'arrêt est nécessaire pour la sûreté de fonctionnement (topologie peu utilisée en traitement d'eau).

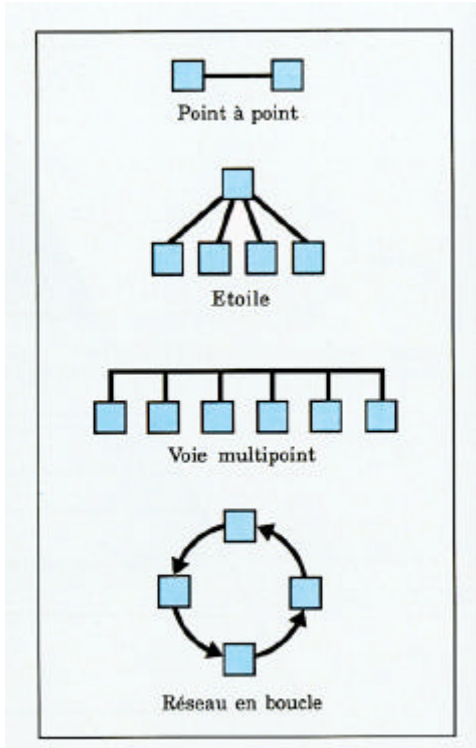


Figure 767. Topologies de réseau.

4 - Le réseau à voie multipoint (encore appelé BUS): toutes les stations partagent le même support de transmission (la même voie) et il est nécessaire de définir le mode d'accès à la voie pour éviter les conflits selon l'une des trois méthodes suivantes

- système maître-esclave: une station appelée maître interroge successivement les autres stations appelées esclaves. Certains réseaux utilisent la technique du maître flottant dans laquelle, lorsque la station maître est défaillante, une autre station est élue maître parmi les stations esclaves en service,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- la technique du jeton grâce à laquelle chaque station accède à la voie lorsqu'elle y est autorisée par la réception d'un message particulier, appelé jeton, provenant de la station précédente.
Des dispositifs particuliers permettent que le jeton soit unique et qu'il ne soit pas perdu,
- la technique de l'accès aléatoire consiste à permettre à n'importe quelle station de se connecter à la voie, si aucune autre station ne l'occupe. Des mécanismes de détection de "collision" sont prévus.

Les règles qui régissent les différents échangent entre stations sont les protocoles qui doivent être programmés dans chacune des stations d'un réseau.

Des passerelles de communication ou communicateurs sont parfois utilisées pour raccorder des stations qui possèdent un protocole différent de celui utilisé sur le réseau considéré. On peut ainsi constituer un réseau hétérogène, c'est-à-dire qui relie des équipements différents provenant de constructeurs différents.

La vitesse de transmission se mesure en BAUDS, c'est-à-dire en nombre de bits par seconde.

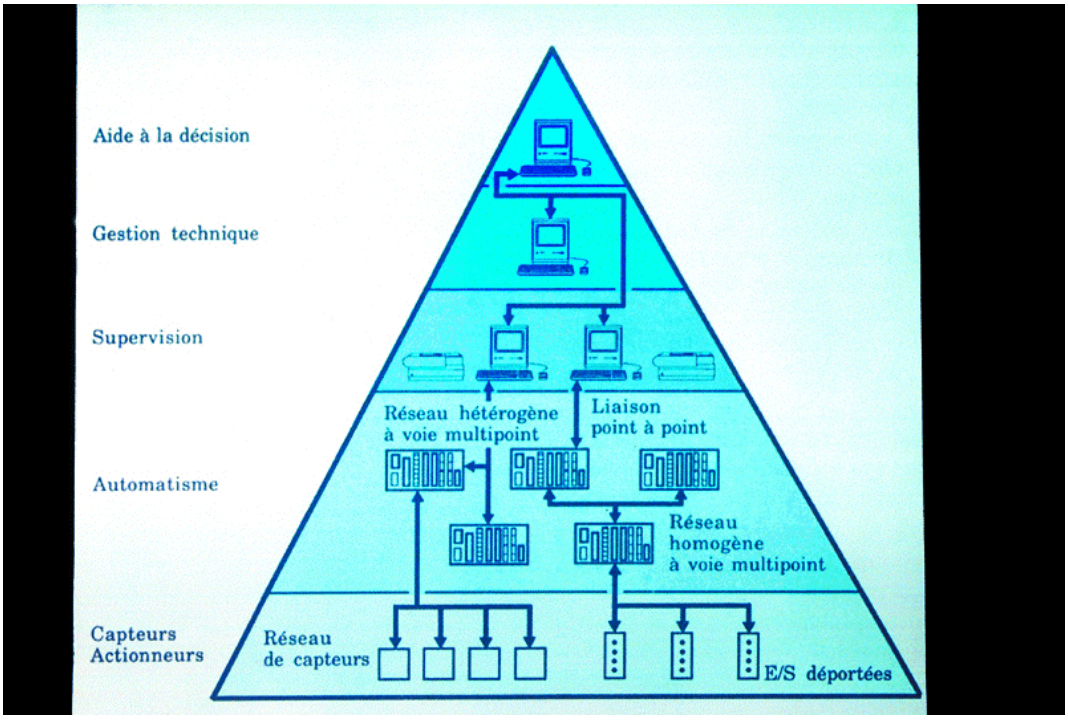
On utilise fréquemment les vitesses normalisées 19 200, 9 600, 4 800... bauds depuis les réseaux de terrain, de coordination et de supervision.

Lorsque le nombre d'informations devant transiter sur une même voie de communication est élevé, 'on utilise des vitesses plus importantes, par exemple de 1 à 10 millions de bits par seconde (méga bauds).

Cependant, le paramètre important à considérer pour le choix d'un réseau est relatif au temps que mettra une information pour atteindre son destinataire qui dépend, non seulement de la vitesse de 1163 transmission, mais également du nombre de stations raccordées, du flux des données à transmettre et des protocoles utilisés.

La figure 768 illustre la position des différents réseaux dans la pyramide hiérarchique de la figure 766.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



4.8. CONSEILS DE MISE EN OEUVRE

"Avec l'informatique on peut tout faire" dit le dicton populaire des informaticiens. Oui, mais à condition d'y mettre le prix et malgré les perspectives extraordinaires qu'ouvre l'informatique, il faut savoir choisir les solutions adaptées aux nécessités réelles de l'exploitation et aux contraintes économiques.

On doit également tenir compte des caractéristiques propres à l'équipement informatique. Quelques exemples :

4.8.1. Conditions d'installation et d'entretien

Le matériel informatique et péri-informatique doit être installé dans un milieu climatique sain du point de vue température, humidité, poussière et protégé des perturbations électriques telles que coupures d'énergie, parasites, foudre...

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Mis à part les éléments mécaniques sensibles à l'usure (disques et imprimante), tout le matériel électronique peut subir des pannes aléatoires indépendantes de la durée de vie de l'équipement. Il faut donc bien étudier au préalable les possibilités de marche dégradée et disposer d'un personnel d'exploitation capable de changer rapidement des cartes électroniques.

4.8.2. Évolution technologique

L'implantation de l'informatique impose de nouvelles méthodes de travail et l'effort de formation du personnel d'exploitation doit être maintenu en permanence pour qu'il soit capable de faire évoluer son installation. Le concepteur peut l'aider dans cette tâche grâce à un contrat de maintenance tant matériel que logiciel.

4.8.3. Limites de performances

Les limites d'un système sont difficiles à appréhender avant d'en avoir eu l'expérience.

La tentation est grande d'utiliser toutes les possibilités d'un système sans vérifier qu'elles puissent être toutes compatibles entre elles, au risque d'être limitées par une capacité mémoire trop juste ou d'allonger démesurément des temps de réponse par écroulement des performances.

On doit donc veiller à se limiter d'abord aux tâches et traitements utiles aux objectifs que l'on s'est initialement fixés puis évoluer progressivement au fur et à mesure des besoins.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Certaines de ces étapes de traitement micro-organismes dont l'effet peut être ont un effet biologique (ligne n° 7) : dès bénéfique pour l'eau traitée; c'est le cas qu'un procédé de traitement met en des étages de filtration (sur sable et sur oeuvre une interface solide liquide, cette CAG) et, pour une faible part, du lit de interface favorise le développement de boue des appareils de décantation.

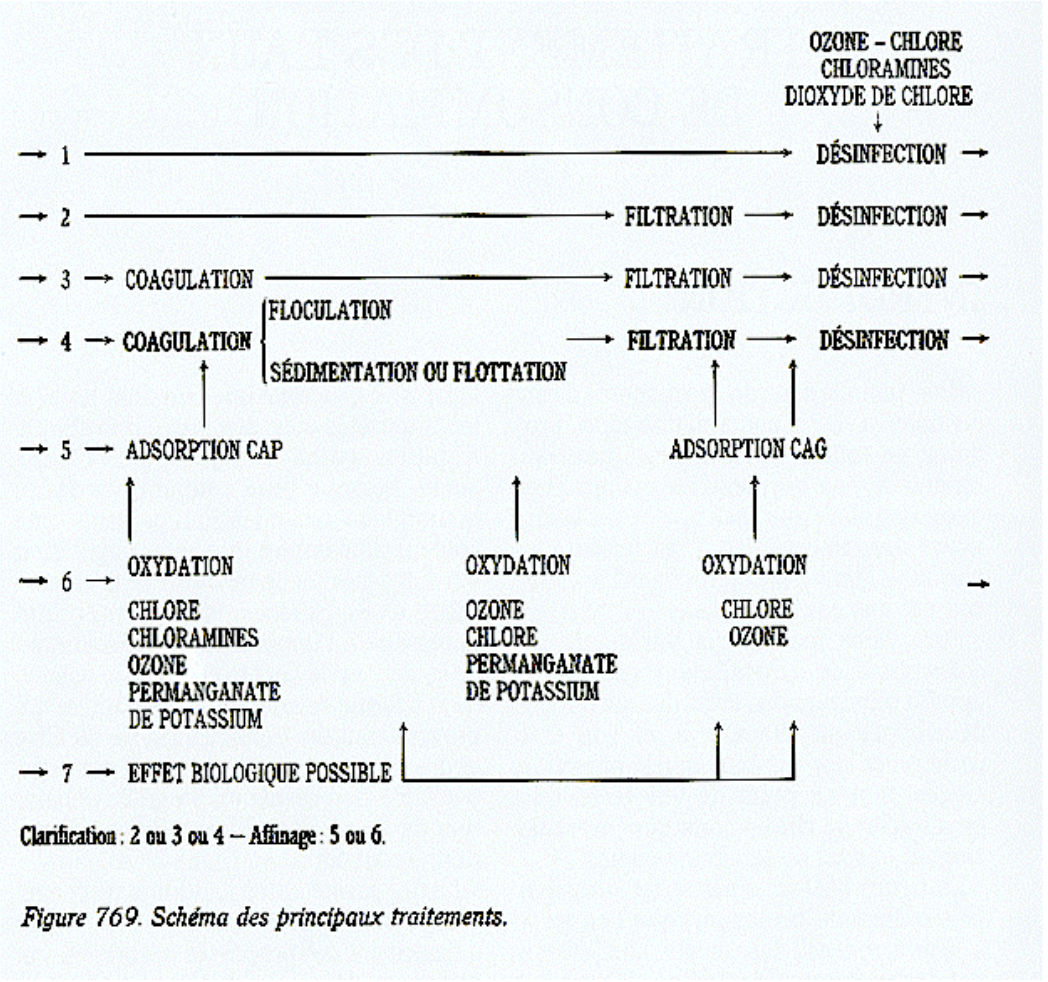


Figure 769. Schéma des principaux traitements.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

22
TRAITEMENT DES EAUX DE CONSOMMATION

INTRODUCTION

Une installation de traitement d'eau destinée à la consommation doit produire, en toutes circonstances, une eau répondant aux normes (fixées dans chaque pays) alors que l'eau brute peut avoir, avant traitement, des caractéristiques variables, tout particulièrement si cette eau est une eau de surface.

Pour faire face à ces variations, la conception de (installation peut faire appel à plusieurs des procédés qui ont été développés au chapitre 3, et fou doit rechercher leur combinaison la plus judicieuse, tant au point de vue technique qu'au point de vue économique (investissement et tout de fonctionnement).

La figure 769 schématise les principales chaînes de traitement que fou peut rencontrer, et qui doivent être complétées par des traitements spécifiques éventuellement rendus nécessaires par la présence d'un composé bien déterminé et indésirable (fluor, nitrate, calcium...).

La ligne n° 1 concerne une eau claire et sans pollution, dont le seul traitement peut être une désinfection destinée à assurer la qualité microbiologique. La ligne n° 2 concerne une eau dont les seules impuretés sont des MES. Une simple filtration avant désinfection est suffisante. Lorsque l'eau contient une faible quantité de colloïdes, ou présente une couleur plus importante, une coagulation sur filtre permet de résoudre le problème (ligne n° 3). Si la quantité de coagulant nécessaire à l'élimination des colloïdes ou de la couleur devient trop élevée le volume de flot formé devient très important, ce qui provoquerait un colmatage rapide du filtre et des lavages trop fréquents; il est indispensable de prévoir un étage de séparation du flot formé (décantation ou flottation) avant filtration (ligne n° 4).

Le flot formé après (addition de coagulant permet de bien clarifier l'eau. Ce flot a également des propriétés adsorbantes et certains polluants dissous peuvent s'adsorber à sa surface. Mais si la concentration en MO polluantes est trop importante, il peut être indispensable de mettre en place des traitements complémentaires: oxydation (ligne n° 6) ou adsorption (ligne n° 5) qui peuvent se combiner avec l'un ou (autre des traitements de clarification.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Certaines de ces étapes de traitement micro-organismes dont l'effet peut être ont un effet biologique (ligne n° 7) : dès bénéfique pour l'eau traitée; c'est le cas qu'un procédé de traitement met en des étages de filtration (sur sable et sur oeuvre une interface solide liquide, cette CAG) et, pour une faible part, du lit de interface favorise le développement de boue des appareils de décantation.

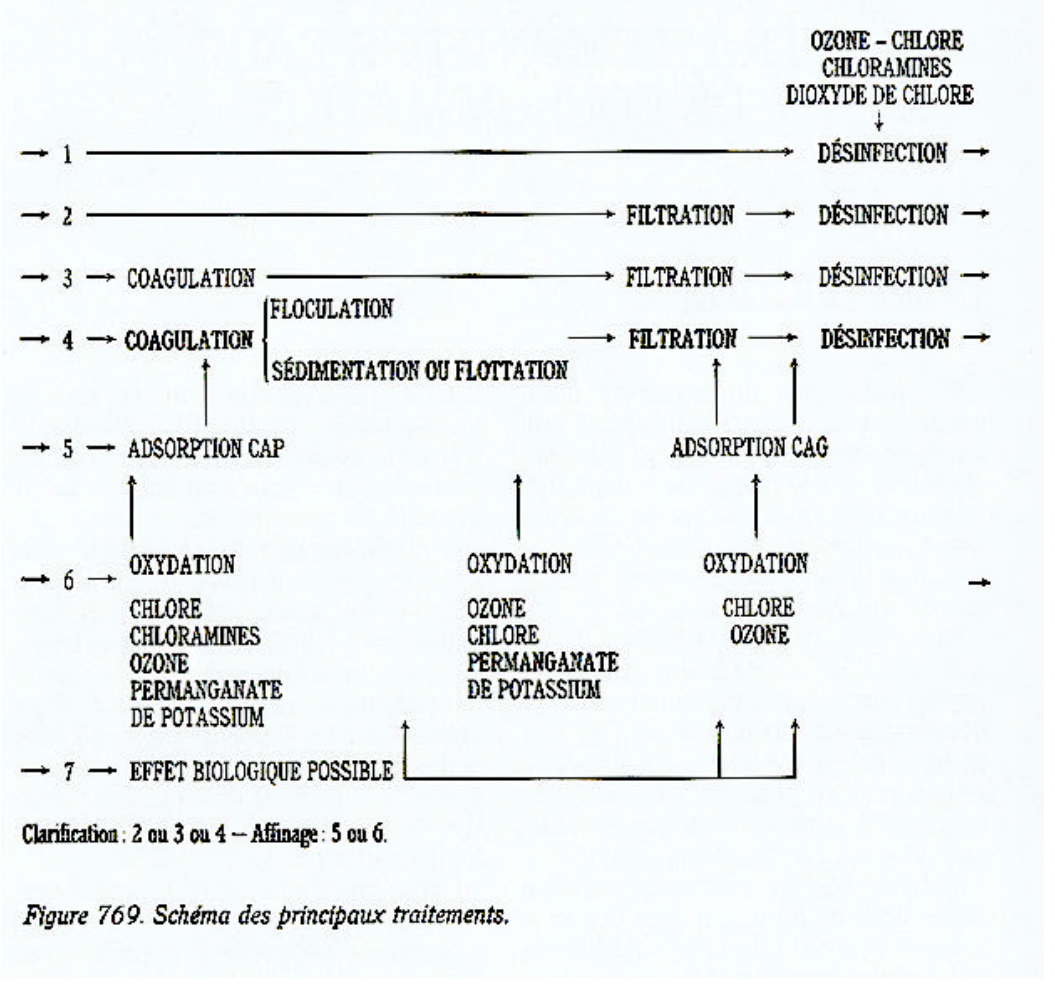


Figure 769. Schéma des principaux traitements.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1. PROCÉDÉS GÉNÉRAUX

1.1. STOCKAGE D'EAU BRUTE (EMMAGASINAGE)

Le stockage d'eau brute présente un intérêt dans le cas de sécheresse prolongée (baisse du débit des rivières, avec souvent altération de la qualité de l'eau). Le volume d'eau brute emmagasinée doit permettre de répondre à la demande en eau de la période la plus longue envisagée.

Le stockage présente également un intérêt lorsqu'il y a une pollution accidentelle qui détériore la qualité de l'eau brute de façon inacceptable pour l'installation de traitement On peut arrêter le pompage en rivière pour utiliser l'eau stockée, en évitant ainsi l'arrêt de la production d'eau traitée. Le volume du stockage est alors déterminé en fonction des risques de pollution en amont de la prise d'eau, et de la durée maximale envisagée pour l'arrêt du pompage direct d'eau brute.

Avec des conditions géographiques et climatiques favorables à la vie planctonique, l'emmagasinage d'eau brute présente certains inconvénients. On constate, lorsque le temps de stockage est insuffisant, un développement important d'algues et de champignons dont les métabolites peuvent communiquer un goût désagréable à l'eau; l'élimination de ce mauvais goût peut être très coûteuse. Si le temps de rétention dans la réserve est suffisant (1 mois), il se développe un zooplancton capable de réduire certains de ces inconvénients. Parallèlement, certaines caractéristiques de l'eau peuvent s'améliorer: diminution de la teneur en MES, en ammonium et de la flore bactérienne.

Le stockage d'eau brute requiert de grandes surfaces de terrain, onéreuses, voire irréalisables en milieu urbain. En outre, un nettoyage périodique de la réserve peut s'avérer nécessaire.

Enfin, la réalisation de stockages d'eau de grandes dimensions (barrages...) demande des précautions particulières lors de la mise en eau, afin d'éviter tout phénomène d'eutrophisation brutale: il faut éliminer toute la végétation et la brûler à l'extérieur du périmètre de remplissage, décaper le sol de toute terre végétale et de tout dépôt polluant éventuellement préexistant (décharges, dépôts de produits chimiques...).

1.2. DISPOSITIONS A LA PRISE D'EAU

Quand il s'agit d'une eau souterraine, le premier souci doit être de concevoir un captage ou un pompage qui entraîne avec l'eau le minimum de terre et de sable. Il est indispensable qu'un périmètre de protection suffisamment important soit bien déterminé (cf. législation éventuelle du pays concerné).

En rivière, il faut adapter la prise aux différents matériaux grossiers que cette eau peut contenir. La bonne conception d'une prise d'eau est le point de départ du traitement

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.1. Conception d'une prise d'eau

Dans un lac à **niveau sensiblement constant** la cote du point de prélèvement de l'eau doit être choisie de telle façon que tout au long de l'année les teneurs de l'eau en MES, en matières colloïdales, en fer ou en manganèse, en plancton, soient les plus faibles possible.

Si le lac est d'assez grande profondeur, on a en général intérêt à prélever l'eau à 30-35 m de la surface; l'influence de l'éclairement devient alors assez faible pour donner l'assurance d'une teneur limitée en plancton, surtout lors des périodes de grande prolifération. Il faut cependant que ce prélèvement s'effectue au moins à 6-8 mètres au-dessus du fond pour éviter d'être fortement influencé par

le mouvement des particules déposées et les courants de fond.

Il faut enfin tenir compte des possibilités de "retournement" des eaux du lac, phénomène qui se produit sous l'influence des variations de température (inversion).

Une prise construite sur une **retenue à plan d'eau variable**, celle d'un barrage, par exemple, doit tenir compte des mêmes phénomènes, ce qui conduit systématiquement à concevoir des tours de prise permettant des prélèvements à différentes hauteurs suivant les saisons.

Une prise construite **en rivière** doit être conçue pour se prémunir contre les différents corps charriés: terre, sable, feuilles, joncs, herbes, débris d'emballages en particulier en plastique, corps flottants, nappe de mousse ou d'hydrocarbures, etc. Il n'existe pas un modèle de prise idéale mais des types de prise, adaptés non seulement au charriage de la rivière mais aussi à son régime, à la nature et au dessin des rives, ainsi qu'aux possibilités de navigation et d'accès. Ceci peut conduire à des prises par le fond, des prises latérales, des prises par siphon, etc. Chaque cas demande un examen particulier.

1.2.2. Dégrossissage

Suivant la nature des eaux prélevées, le premier traitement possible est un dégrossissage, ayant pour but d'éliminer les matières de grandes dimensions susceptibles de gêner la mise en oeuvre des autres traitements.

Il peut comporter (voir chapitre 9)

- un dégrillage,
- un tamisage, aussi appelé macrotamisage. Il est nécessaire si l'eau charrie des herbes, des feuilles, des débris plastiques... Le nettoyage doit être automatique. L'absence de cet appareil, par souci d'économie, est la cause de perturbations de bon nombre d'usines, surtout quand elles comportent un pompage de relevage,
- un dessablage, qui peut être placé suivant les conditions de prise, soit avant, soit après l'éventuel tamisage. Un tel dessablage est indispensable quand les appareils de traitement qui suivent sont susceptibles d'être fortement affectés par des quantités notables de sable,
- un microtamisage, si la quantité de plancton est limitée et si aucune décantation n'est prévue ultérieurement. Étant donné l'action limitée des microtamis, il est rare que ce traitement soit bien adapté aux stations modernes,
- un déshuilage de surface,
- un débourbage, nécessaire quand la quantité de MES de l'eau brute à éliminer (limons, argile...) dépasse la capacité de concentration et d'extraction des décanteurs situés en aval.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2.3. Prétraitement au chlore

La protection des conduites d'eau brute peut nécessiter un prétraitement par le chlore ou par l'un de ses composés (eau de javel, hypochlorite, dioxyde de chlore).

Lorsqu'une eau riche en MO et en plancton doit être amenée à la station principale par une conduite de grande longueur, il est indispensable de prévoir au départ un traitement par un oxydant, faute de quoi on s'expose à voir le débit de la conduite s'abaisser rapidement par suite du développement de plancton sur la paroi. Ce prétraitement est également nécessaire pour des conduites de faible longueur en cas de présence de moules d'eau douce (Dreissena polymorpha).

Des bactéries ferrugineuses ou sulfato-réductrices peuvent attaquer le fer des conduites métalliques: on voit alors s'élever la teneur en fer de l'eau, surtout lors de périodes d'arrêt du traitement; une chloration permet de réduire ces inconvénients.

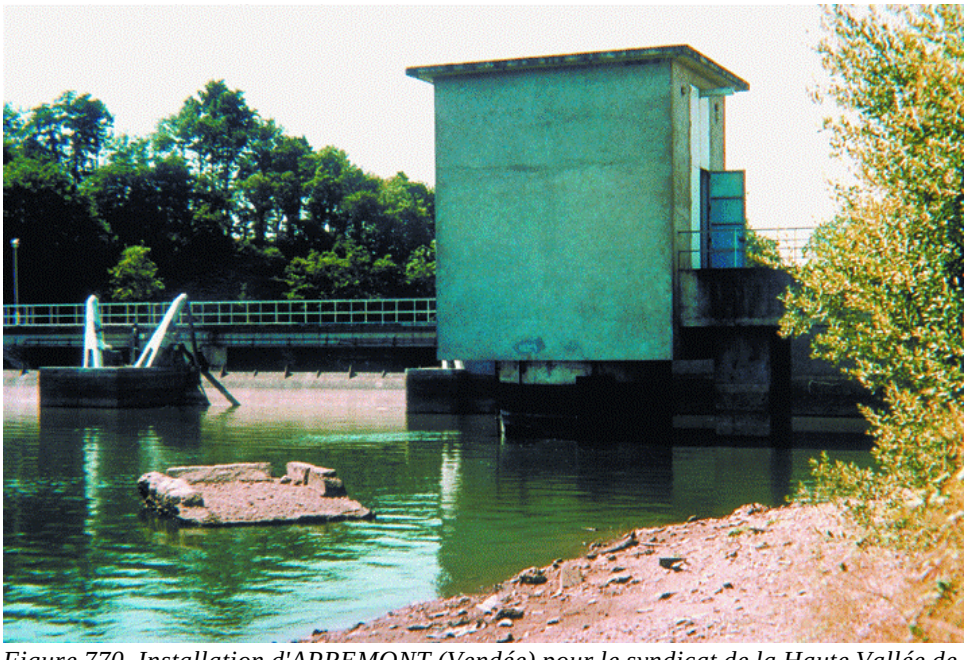


Figure 770. Installation d'APREMONT (Vendée) pour le syndicat de la Haute Vallée de La Vie. Débit. 2 000 $m^3.h^{-1}$. Prise d'eau sur le barrage d'Apremont alimentant la station d'EP

1.3. LA PRÉOXYDATION

Cette préoxydation ne concerne pas la protection de la conduite d'eau brute (qui a été envisagée au paragraphe précédent), mais le traitement d'oxydation à effectuer en tête d'installation de traitement

1.3.1. Traitement physique: aération

Cette aération est nécessaire si l'eau présente un défaut d'oxygène; l'aération permet alors

- l'oxydation des ions ferreux,
- l'augmentation de la teneur en oxygène, afin de rendre l'eau agréable à boire,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de lutter contre l'anaérobiose et d'éviter la corrosion de conduites métalliques en permettant la formation de la couche protectrice.

L'aération peut également être nécessaire si l'eau contient des gaz en excès

- H_2S, qui donne un goût très désagréable et qui s'élimine aisément par une simple aération atmosphérique,
- oxygène, quand l'eau est en état de sursaturation et que son dégagement est susceptible de troubler le fonctionnement des décanteurs, dont le floc a tendance à remonter en surface, et des filtres qui subissent un faux encrassement par dégazage au sein de la masse filtrante (embolie gazeuse),
- dioxyde de carbone (CO_2), rendant une eau agressive; son élimination par aération doit s'effectuer à la pression atmosphérique. Elle doit être plus ou moins poussée en fonction de la minéralisation de l'eau; en effet, il peut être nécessaire de ne procéder qu'à une élimination partielle du gaz carbonique, la portion restante pouvant servir à accroître la minéralisation de l'eau par réaction sur produits neutralisants.

1.3.2. Traitement chimique

On peut utiliser à cet effet le chlore et ses dérivés, l'ozone ou le permanganate de potassium.

1.3.2.1. Préoxydation par le chlore

La préchloration avant clarification s'est surtout développée dans les années 60. Ses avantages sont bien connus

- amélioration de la floculation, par action sur les MO adsorbées sur les MES. Il en résulte une augmentation du coefficient de cohésion de la boue, permettant des vitesses de décantation plus élevées,
- élimination de la plupart des algues et autres organismes (zooplancton, phytoplancton) susceptibles de se développer dans les décanteurs et les filtres, ce qui facilite l'exploitation (propreté des décanteurs, durée de vie des filtres). On évite ainsi la possibilité de fermentations anaérobies éventuelles,
- diminution de la couleur (lorsqu'elle est due à des matières humiques),
- élimination de l'ammonium, si le taux appliqué est supérieur au point critique, et dés nitrites,
- diminution éventuelle du taux de traitement en coagulant,
- élimination partielle des mauvais goûts,
- stabilisation de l'absorption de chlore en fonction du temps (test de conduite, voir page 253),
- plus grande sûreté dans la désinfection de l'eau distribuée.

Les taux de traitement à employer correspondent généralement au point critique, avec maintien d'un taux de chlore libre résiduel s'il y a présence d'amonium à éliminer. Dans le cas d'amonium minéral, le rapport Cl_2/NH_4^+ (en $mg.l^{-1}$) nécessaire est de 7. Il augmente avec la teneur en MO et peut aller jusqu'à 15, voire 25. On peut aussi utiliser un taux de traitement inférieur au point critique. On forme alors des chloramines et il est indispensable de vérifier que cette façon de procéder ne provoque pas l'apparition de mauvais goûts éventuels (par ex.: présence de phénols oxydés en chlorophénols); difficiles à éliminer par la suite.

Mais la préchloration s'accompagne de la formation de composes indésirables, qui peuvent, être dangereux pour la santé,: organochlorés, halométhanes (haloformes), (voir page 44). Ces composés se forment par action du chlore sur

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

certains composés de l'eau, appelés précurseurs; il est donc souhaitable de reporter le point de chloration le plus loin possible dans la chaîne de traitement, après l'élimination la plus complète possible de ces précurseurs.

La préchloration ne peut être maintenue que si

- l'eau ne contient pas de précurseurs en concentration importante,
- l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique est recherchée. La cinétique d'oxydation par le chlore du manganèse Mn^{2+} en dioxyde de manganèse est souvent trop lente pour être efficace dans la pratique.

1.3.2.2. Préoxydation par les chloramines

Si l'eau brute ne contient pas d'ammonium, on peut envisager d'injecter dans l'eau des chloramines préalablement produites par action du chlore sur de l'ammoniaque ou du sulfate d'ammonium.

1.3.2.3. Préoxydation par le dioxyde de chlore

Cette technique s'est développée momentanément pour tenter de remplacer le chlore en préoxydation. En effet, le dioxyde de chlore, s'il ne permet pas d'oxyder l'ammonium, ne conduit pas non plus à la formation d'haloformes. Mais la réaction d'oxydoréduction du dioxyde avec les MO libère des ions ClO_2^- qu'il est nécessaire d'éliminer par la suite. L'usage de dioxyde de chlore en préoxydation a donc tendance à décroître. Il reste toutefois utilisé dans certains cas pour oxyder le Mn^{2+} en $Mn0_2$: la cinétique de cette réaction est en effet plus rapide que la cinétique d'oxydation du Mn^{2+} par le chlore.

1.3.2.4. Préoxydation par l'ozone

Utilisée avant filtration cette technique peut être mise en oeuvre pour l'élimination du **fer** (voir page 1202) **ou du manganèse** (voir page 1213). Elle peut également être employée pour l'amélioration de la clarification.

- **Coagulation sur filtre**

Un exemple est donné par l'installation de ROBERVAL (figure 771).

La préoxydation par l'ozone permet

-l'oxydation partielle des M0,

- la destruction du complexe organo-métallique liant le fer et le manganèse (quand ils sont présents) à la matière organique,
- l'oxydation de ce fer et de ce manganèse,
- la formation d'un flot susceptible d'être retenu par filtration.

Au cas où l'eau brute contient une quantité appréciable de colloïdes, il peut être indispensable d'ajouter un coagulant. Si le flot formé est trop fragile, il peut être indispensable d'utiliser un adjuvant qui améliore la cohésion du flot et évite ainsi la crevaison prématurée du filtre, avant qu'il n'atteigne la perte de charge maximale prévue par construction.

- **Amélioration de la décantation**

L'installation de traitement du MONTVALÉRIEN, près de Paris, (figure 772) met en oeuvre cette technique. La dose d'ozone à introduire doit être limitée à celle permettant de favoriser la formation du flot ; un taux trop élevé restabilise les colloïdes, ce qui entraîne une détérioration de la floculation et de la décantation. Il est généralement compris entre 0,2 et 1,5 $mg.l^{-1}$. Le temps de contact doit être limité (2 à 3 min au maximum).

Les avantages de cette technique sont les suivants

- amélioration de la floculation et du coefficient de cohésion de la boue,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 771. Schéma général de l'installation du lac Saint Jean à ROBERVAL (Canada). Débit: 400 $m^3.h^{-1}$.

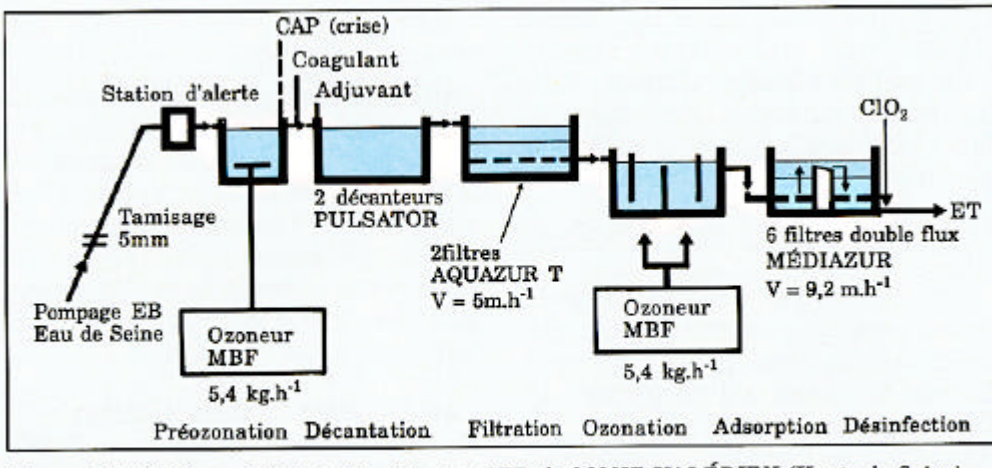


Figure 772. Schéma général de l'installation CEB du MONT-VALÉRIEN (Hauts-de-Seine). Débit: 2 200 $m^3.h^{-1}$.

- amélioration de la décantabilité du floc,
- élimination des MO plus importante, en particulier des précurseurs d'haloformes,
- limitation de la prolifération du plancton dans les décanteurs. Il y a en réalité sélection des espèces, certaines étant presque complètement éliminées, alors que d'autres persistent, et la couverture du décanteur peut être nécessaire,
- diminution de la dose de coagulant à utiliser (économie allant de 10 à 50 % en fonction des eaux à traiter et des périodes de l'année),
- diminution de la dose d'ozone à appliquer en fin de chaîne de traitement. Le taux total d'ozone utilisé (préozonation + postozonation) peut même dans certains cas être inférieur à ce qu'il serait s'il n'y avait pas de préozonation.

Remarque: l'utilisation de l'ozone en préoxydation en vue de l'amélioration de la clarification doit être complétée par

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

une ozonation après clarification afin de permettre l'oxydation complète des composés éventuellement formés lors de la préozonation.

1.3.2.5. Préoxydation par le permanganate de potassium

Cet oxydant est utilisé tout particulièrement lorsque l'eau brute contient du manganèse. Il y a oxydoréduction des ions manganèse et permanganate suivant la, réaction

$$3\ Mn^{2+} + 2\ Mn(VII) \rightarrow 5\ \underline{Mn(IV)}\downarrow$$

Cette réaction est favorisée par un pH élevé, qui augmente la cinétique de la réaction. Toutes les fois où il est nécessaire d'utiliser de la chaux pour corriger le pH de floculation (cas des eaux peu minéralisées), on a intérêt à prévoir un temps de contact de quelques minutes après l'introduction de la chaux et du permanganate de potassium, et avant l'introduction du coagulant

Le permanganate de potassium est aussi parfois utilisé pour l'oxydation partielle de certaines MO et l'élimination de certains mauvais goûts.

L'utilisation du KMn04 en préoxydation exige de bien contrôler la dose injectée; un excès de taux de traitement peut provoquer la présence d'une coloration rose de l'eau traitée, due à la présence de Mn(VII) soluble.

Figure 773. Installation du MONT-VALÉRIEN (Hauts-de-Seine) pour la CEB. Vue d'un décanteur PULSATOR et du bâtiment de préozonation.

1.4. LA CLARIFICATION

La clarification est l'ensemble des opérations permettant d'éliminer les MES d'une eau brute ainsi que les polluants (organiques et minéraux) associés à ces MES par adsorption, formation de complexes...

L'adjonction d'un coagulant à une eau permet

- l'annulation du potentiel électronégatif des particules: c'est la coagulation

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

totale des colloïdes qui peuvent ensuite floculer,

- la coprécipitation de certaines M0,
- l'adsorption de certaines MO et de la couleur sur le floc formé.

Compte tenu de la qualité de l'eau brute dont on dispose, la quantité de coagulant à utiliser peut être importante : il est donc nécessaire d'éliminer la majeure partie de ce floc, lors d'une étape de séparation (par décantation ou flottation) avant filtration. En effet, la capacité de rétention d'hydroxyde par un filtre est limitée, et si l'on cherchait à filtrer l'eau directement sans opération préliminaire, le filtre serait trop rapidement colmaté, entraînant des lavages fréquents, d'où une perte d'eau intolérable économiquement, voire techniquement.

Si le taux de traitement à appliquer est faible, on peut alors se contenter d'une filtration directe après introduction du coagulant (et éventuellement d'un adjuvant) c'est la **coagulation sur filtre.** Cette technique peut également être utilisée dans le cas où une coagulation partielle (c'est-à-dire n'aboutissant pas à une annulation complète du potentiel électronégatif des particules) permet de donner une qualité suffisante (bien que n'étant pas la meilleure possible) de l'eau traitée.

Si le floc formé après la coagulation totale comporte une forte proportion d'hydroxyde (rapport $AI(OH)_3$/MES de l'eau brute élevé), la densité du floc est faible, et il peut être avantageux d'utiliser, pour la phase de séparation, la flottation et non la décantation.

1.4.1. Clarification par coagulation, floculation, décantation et filtration

Elle est réservée aux eaux qui présentent l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes

- une teneur en MES dépassant 20 à 40 $g.m^{-3}$, pendant toutou partie de l'année, - une couleur supérieure à 30 $mg.l^{-1}$ de Pt-Co (d'autres traitements examinés plus loin sont possibles lorsque l'excès de couleur est le seul défaut d'une eau),
- une teneur en MO élevée, qu'on veut réduire à son minimum,
- une teneur en métaux lourds supérieure à la concentration maximale recommandée,
- une présence abondante, même temporaire, de plancton; en effet, seule une coagulation-filtration-décantation combinée à une préoxydation est susceptible de permettre une réduction de 95 à 99 % du plancton, le reste étant éliminé par filtration. Un microtamisage est, de loin, incapable d'atteindre ce but.

Cette clarification peut conduire à différents schémas suivant l'importance des MES contenues dans l'eau.

1.4.1.1. Clarification des eaux fortement turbides

Lorsqu'on doit craindre des teneurs en MES dépassant 1500 à 3 000 $g.m^{-3}$ pendant un temps prolongé, il faut envisager:

- soit une **décantation en un stade** dans un décanteur-floculateur raclé. Ce procédé n'est admissible que si la teneur maximale n'est pas trop importante et ne conduit pas à un volume de boues excessif susceptible d'engorger le décanteur. Les vitesses ascensionnelles généralement admises varient entre 1 et 1,50 $m.h^{-1}$, quelquefois 2 $m.h^{-1}$,
- soit une **décantation en deux stades** un décanteur-dégrossisseur (débourbeur) suivi d'un décanteur-finisseur. Ce schéma permet de faire front aux eaux les plus chargées en argiles.

Le débourbeur, pour être efficace, ne doit pas être considéré comme un organe

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de dessablage. S'il y a du sable en quantité notable, il doit être éliminé au préalable jusqu'à un diamètre de 0,1 à 0,2 mm, faute de quoi le fonctionnement du dispositif de raclage du décanteur-dégrossisseur serait exposé à des coincements et à des dégradations.

Si for veut impérativement exploiter cet ouvrage sans aucun réactif, quelle que soit la qualité de l'eau brute, même pendant les pointes de turbidité, il est indispensable de dimensionner largement le débourbeur afin qu'il puisse fonctionner de façon satisfaisante au moment des pointes.

Si on accepte d'utiliser des réactifs pendant une partie de (année, il est possible d'adopter,, un dimensionnement plus réduit : le débourbeur fonctionne alors sans réactif pendant les périodes . de moyenne turbidité; au moment des périodes de pointe (plus de 5 000 à 10 000 $g.m^{-3}$) une injection de coagulant et/ou floculant permet d'obtenir le dégrossissage désiré.

La fixation de la vitesse dans le débourbeur est essentiellement fonction de la nature des matières à éliminer, de leur importance, de la dose de coagulant injecté, et surtout du volume de boue à éliminer.

En période de crue, il peut être nécessaire d'ajouter également un réactif neutralisant pour corriger le pH de l'eau, alors que (addition de ce réactif peut ne pas être utile le reste du temps.

Le second décanteur reçoit alors une eau de qualité variant dans des limites acceptables et peut délivrer, après coagulation totale et floculation, une eau décantée toujours de bonne qualité.

Le poste de distribution de réactifs doit être particulièrement étudié, pour faire face à une grande amplitude de variation des taux de traitement (variations même d'une année à (autre). L'injection de réactif en deux points de la chaire de traitement (avant le débourbeur et avant le décanteur finisseur) n'entraîne pas un excès de consommation de réactif, mais conduit même à une économie: à un instant donné, la somme des deux injections de réactif est en effet inférieure à la quantité de réactif qu'il aurait fallu injecter en une fois pour obtenir la même qualité d'eau traitée.

L'installation de JORF-EL-ASFAR (Maroc) en est un exemple (figure 774).

Un by-pass (court-circuit) permet de mettre le débourbage hors service lorsque la qualité de l'eau brute ne nécessite pas son utilisation.

1.4.1.2. Clarification des eaux moyennement turbides (40 à 1500-3000 $g.m^{-3}$) : Une coagulation totale, combinée à une floculation et une décantation en un seul stade, est alors en général suffisante. Elle peut s'effectuer soit dans un floculateur suivi d'un décanteur statique, ou mieux dans un décanteur-floculateur à lit de boue, à recirculation de boues, ou raclé; l'installation d'ALGER en est un exemple (figure 775).

Pour obtenir le meilleur résultat de la décantation, il faut, en premier lieu, ajuster au mieux le dosage du réactif de coagulation ainsi que le pH de floculation, éventuellement corrigé par un réactif ,de neutralisation.

L'utilisation d'un adjuvant de floculation est presque toujours bénéfique, non seulement pour augmenter la vitesse de décantation, mais également pour obtenir en tout temps une eau mieux clarifiée. L'expérience montre qu'aucun adjuvant ne permet, en général, de diminuer la dose de coagulant à qualité d'eau traitée égale.

Si for accepte une qualité d'eau inférieure, tout en restant dans la limite des

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

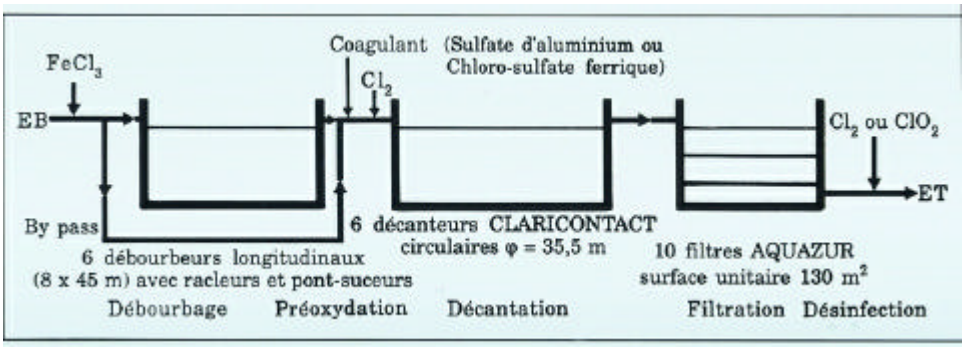


Figure 774. Schéma général de l'installation de JORF-EL-ASFAR (Maroc). Débit: 9000 $m^3.h^{-1}$.

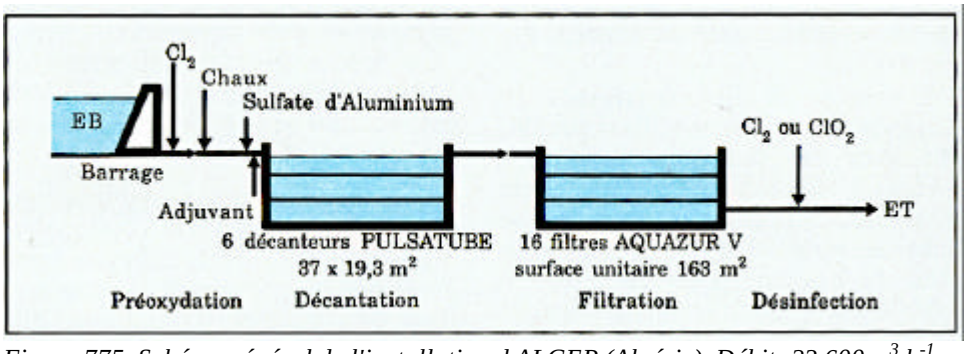


Figure 775. Schéma général de l'installation d ALGER (Algérie). Débit: 23 600 $m^3.h^{-1}$.

normes officielles, on peut diminuer la dose de coagulant avec ou sans emploi d'adjuvant.

Dans les pays où les adjuvants de synthèse sont autorisés pour l'eau potable, on a cherché à réduire la dose de coagulant par adjonction d'adjuvants cationiques. Le choix et la dose de l'adjuvant sont faits après des essais en laboratoire.

Enfin, l'efficacité des différents réactifs demande, pour être optimale, que la floculation s'effectue en milieu concentré en flocs : c'est ce qui fait la valeur des décanteurs-floculateurs où la concentration en boues floculées (et non en MES) est la plus élevée. Il est possible de concevoir un floculateur classique suivi d'un décanteur à court temps de séjour; cet ensemble permet d'obtenir des qualités d'eaux compatibles avec les normes sans toutefois atteindre l'optimum (pas de contact de boue).

Ce traitement de clarification par coagulation totale-floculation, décantation en un stade et filtration est de loin le plus couramment employé; il est compatible avec la mise en oeuvre simultanée de traitements complémentaires tels que déferrisation, démanganisation, affinage. Il présente l'avantage supplémentaire de pouvoir être employé tel quel pendant une partie de l'année et de pouvoir fonctionner en coagulation partielle sur filtre le reste du temps: le décanteur étant alors bipassé. On peut aussi l'utiliser en simple bassin de contact avant filtration aux fins de préchloration éventuelle.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 776. Installation de *FLORENCE* (Italie). *Débit* 5400 + 9000 $m^3.h^{-1}$. Traitement des eaux par clarification filtration.

1.4.2. Clarification par coagulation partielle, floculation et filtration

Lorsque l'eau est peu chargée en MES en permanence (moins de 20 à 40 $g.m^{-3}$ en général), avec une faible couleur (inférieure à 30 unités Pt/Co) et une faible teneur en M0, fer et manganèse, il est possible de la traiter par coagulation partielle suivie de filtration. En général, l'adjonction du coagulant demande un certain temps de contact avant l'arrivée de l'eau sur les filtres, alors que celle de l'adjuvant est à effectuer à leur entrée. La dose de coagulant détermine la turbidité finale après filtration, l'adjuvant ayant pour rôle de ralentir la pénétration dans le lit filtrant des flots très fins à faible cohésion. Ce type de traitement est réservé aux eaux faiblement polluées; sinon le taux de réduction des MO étant plus bas qu'en traitement de coagulation totale, la qualité finale ne saurait être acceptable.

La limitation de ce type de traitement est également liée à la capacité de rétention de la matière filtrante; cette capacité peut être augmentée par l'adoption d'une grande hauteur de couche ou de lits de plusieurs granulométries.

L'installation de la Lyonnaise des Eaux à NARTASSIER est une installation de ce type (figure 777). Cette installation traite l'eau du canal de la Siagne (près de CANNES, France).

Cette eau est à caractère entartrant et il est indispensable d'injecter, avant filtration, une dose suffisante d'H_2SO_4 pour mettre l'eau à l'équilibre.

Normalement, l'installation fonctionne sans injection de coagulant. Lorsque l'eau du canal se trouble (à la suite de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

pluies importantes par exemple), le dosage de coagulant est mis en fonctionnement et permet de produire une eau de la qualité désirée.

Une amélioration intéressante de cette technique est la mise en place de deux étages successifs de coagulation sur filtre, avec possibilité d'ajouter un coagulant et un floculant en amont de chacune de ces étapes: le premier étage de filtration est équipé d'un matériau grossier et joue le rôle de dégrossisseur, fournissant une eau dont la turbidité est normalement comprise entre 5 et 10 NTU. Le deuxième étage de filtration permet de clarifier l'eau jusqu'à l'obtention de la qualité finale requise. La figure 779 représente le schéma de fonctionnement de l'installation rénovée d'IVRY (Val de Marne) qui produit 14 600 $m^3.h^{-1}$ d'eau pour l'alimentation de la ville de PARIS.

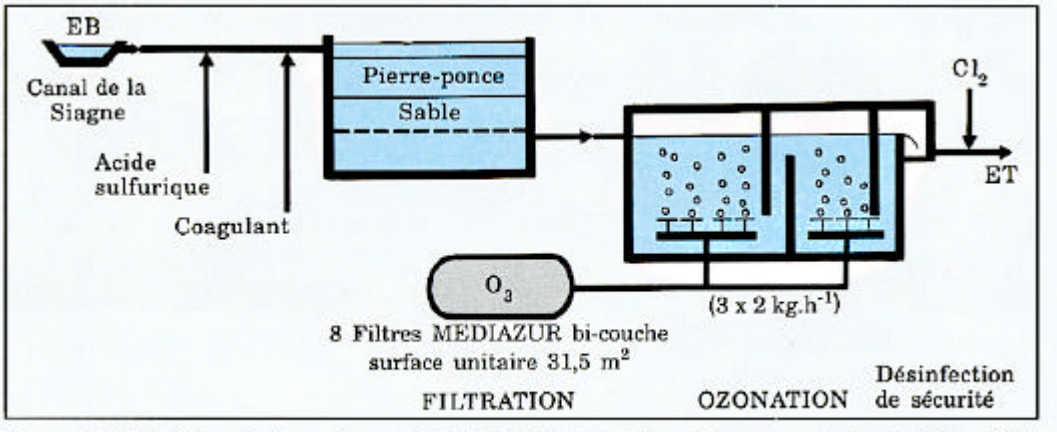


Figure 777. Schéma de l'installation de NARTASSIER (Alpes-Maritimes). Débit : 2 000 $m^3.h^{-1}$.

Figure 778. Lisbon-Asseiceira treatment plant in Portugal. Rated flow: 375,000 $m^3.d^{-1}$. Maximum flow: 500,000 $m^3.d^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 778. Installation de LISBONNE-ASSEICEIRA (Portugal). Débit nominal: 375000 $m^3.j^{-1}$. Débit maximal: 500 000 $m^3.j^{-1}$.

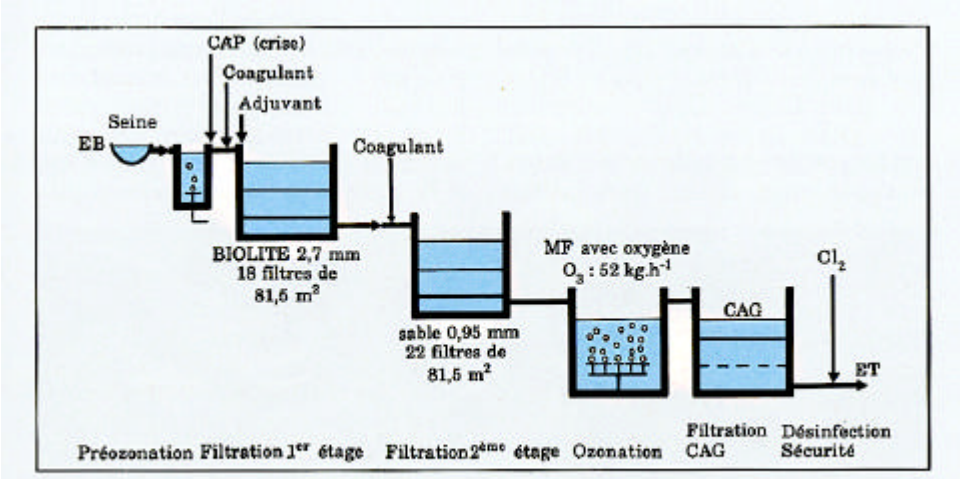


Figure 779. Schéma de fonctionnement de l'installation d'IVRY (Val-de-Marne) pour la SAGEP. Débit : 14 600 $m^3.h^{-1}$

1.4.3. Intérêt de la flottation

La flottation est à recommander pour

- les eaux peu chargées en MES (eaux de lac, de barrage, par exemple),
- les eaux produisant un flot léger, décantant mal,
- les eaux riches en plancton qui, en été, par suite de l'activité chlorophyllienne des algues, ont tendance à être saturées en oxygène, ce qui contrarie la décantation et provoque une remontée du flot, dans le cas de l'utilisation de la décantation.

La flottation possède, en outre, les avantages suivants:

- grande souplesse d'emploi: le démarrage de l'installation est très rapide, pratiquement instantané,
- économie de réactifs de coagulation on observe une économie qui peut aller jusqu'à 30 % par rapport aux doses de coagulant utilisées en décantation,
- épaississement des boues: les boues produites peuvent être dirigées directement vers le système de déshydratation, sans qu'il soit nécessaire de mettre en oeuvre une étape d'épaississement intermédiaire.

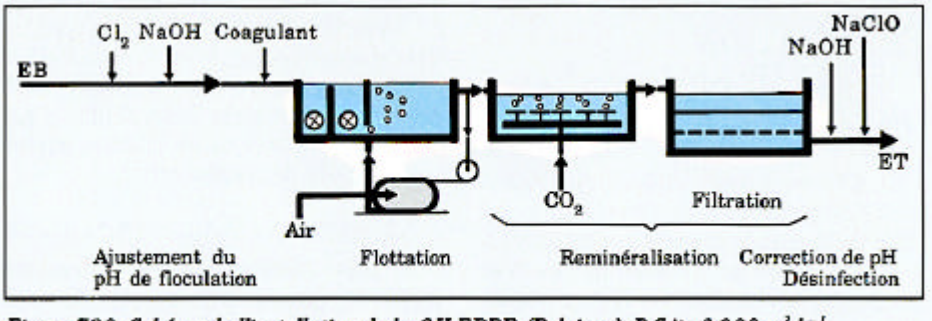


Figure 780. Schéma de l'installation de la GILEPPE (Belgique). Débit : 3 900 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'installation de la GILEPPE (figure 780) traite les eaux d'un barrage. Ces eaux sont acides, colorées, riches en MO et peu minéralisées. Elles contiennent peu de MES. Le flot est donc essentiellement constitué d'hydroxyde d'aluminium sur lequel se sont partiellement adsorbées les MO de l'eau brute. Après flottation, cette installation comporte une reminéralisation comprenant injection de CO_2 et filtration sur produit neutralisant. Cette filtration élimine également la turbidité résiduelle de l'eau flottée et fixe le Mn précipité par l'augmentation de pH.

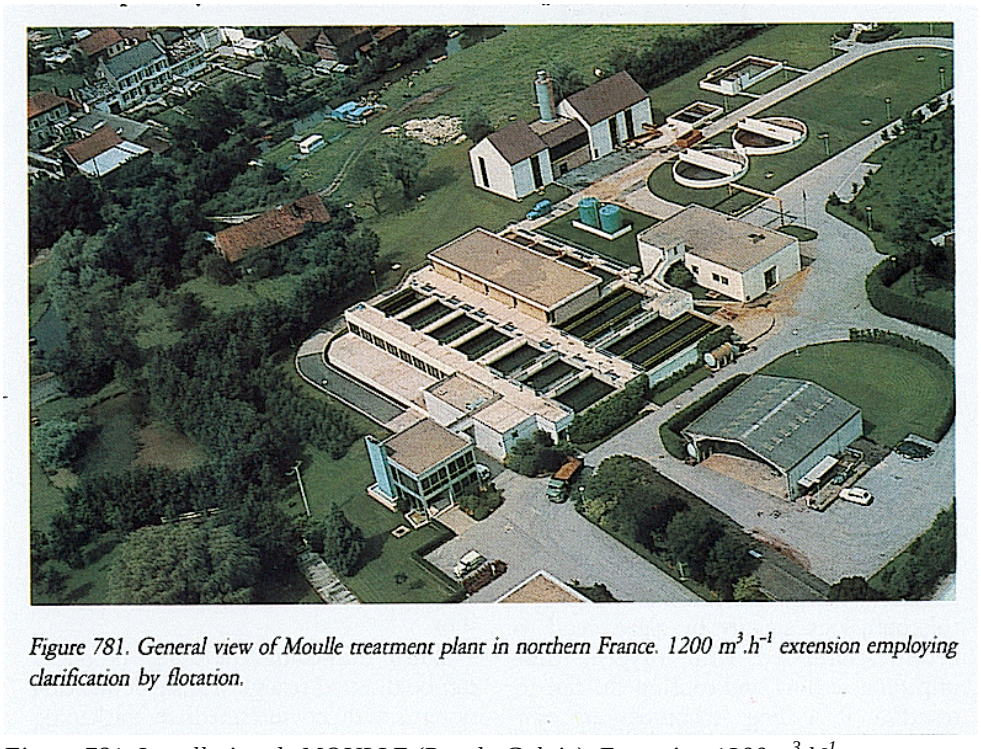


Figure 781. General view of Moulle treatment plant in northern France. 1200 $m^3.h^{-1}$ extension employing clarification by flotation.

Figure 781. Installation de MOULLE (Pas-de-Calais). Extension 1200 $m^3.h^{-1}$. avec clarification par flottation. Vue générale

1.5. ÉLIMINATION DES MATIÈRES ORGANIQUES

On a vu (voir page 38) la grande diversité de composés que recouvre cette appellation. Cette grande diversité se retrouve à la fois dans les propriétés physiques et les propriétés chimiques. Chaque étape de la chaîne de traitement participe à l'élimination d'une certaine partie des M0. En outre, il faut noter que plus la concentration d'une eau brute en MO est élevée, plus la probabilité d'une grande diversité des MO présentes est forte, et plus il est nécessaire de prévoir un nombre important (étapes de traitement.

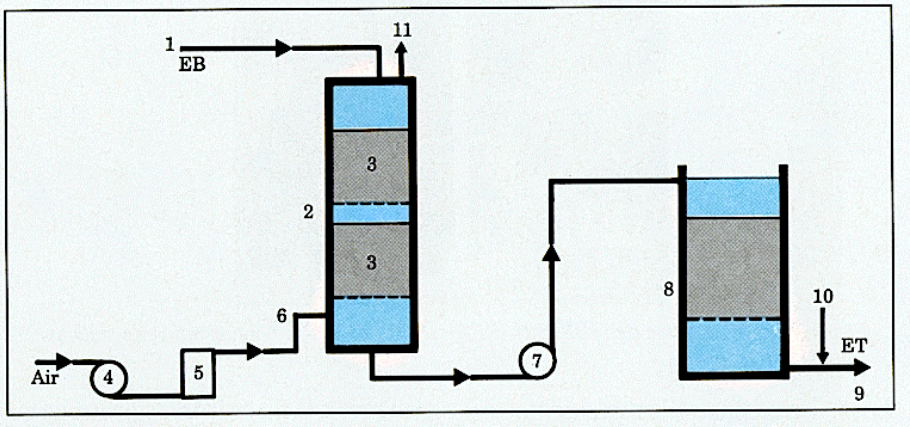
1.5.1. Aération - Entraînement à l'air

Certains produits volatils sont éliminés préférentiellement par une aération qui peut être réalisée en tête de la chaîne de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

traitement (cascade, pulvérisation), dans les goulottes de transfert de l'eau décantée (injection d'air), lors de certains traitements sur bactéries fixées avec insufflation d'air (nitrification), ou lors de l'ozonation.

Si la pollution organique d'une eau n'est due qu'à des composés volatils, une élimination par entraînement à l'air est possible (strippage). C'est le cas de certaines eaux de nappes souterraines. Après strippage, le traitement de finition est assuré par filtration sur charbon actif, comme représenté sur la figure 782.



1. Amenée d'eau brute.
2. Colonne d'entraînement – Strippage.
3. Garnissage de colonne.
4. Ventilation.
5. Filtre à air.
6. Injection d'air dans la colonne de strippage.
7. Pompe de reprise eau strippée.
8. Filtre à CAG.
9. Vers distribution.
10. Désinfection.
11. Event (vers traitement éventuel d'air).

Figure 782. Schéma d'installation d'élimination de solvants chlorés volatils.

1.5.2. Coagulation - Floculation - Décantation (ou Flottation)

Certains composés peuvent soit s'adsorber, soit coprécipiter avec le floc formé après l'introduction d'un sel métallique dans l'eau. On peut citer les composés naturels tels que les acides humiques ou fulviques. Si la clarification est réalisée par coagulation partielle et floculation sur un filtre, le taux d'élimination des MO (oxydabilité au permanganate) est limité à 10 - 30 %. Si l'on met en oeuvre une coagulation totale avec décantation ou flottation, ce taux peut atteindre 40 à 60 %, voire même 70 % en cas d'utilisation conjointe de CAP dans le décanteur.

1.5.3. Filtration

La filtration sur sable ou sur filtre bicouche participe peu à l'élimination des MO lorsqu'elle est située après décantation ou flottation. Cette filtration permet l'élimination du floc résiduel ainsi que des MO adsorbées à la surface de ce floc. Le pourcentage d'élimination est alors compris entre 5 et 10 % (par rapport à l'eau brute).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 783. Installation de MENDEN (RFA). Débit: 210 $m^3.h^{-1}$. Élimination de solvants volatils par steppage.

1.5.4. Traitements complémentaires

Si la concentration en MO dans l'eau est très importante, il est possible que les traitements de clarification ne permettent pas d'en éliminer une partie suffisamment importante. Il est alors nécessaire d'avoir recours à des traitements complémentaires qui sont principalement l'ozonation et l'adsorption.

1.5.4.1. Ozonation

L'ozone améliore considérablement les qualités organoleptiques d'une eau: M0, couleur, goût.

L'ozone permet une réduction importante du paramètre global d'absorption UV: cette action révèle une transformation des MO par ouverture des doubles liaisons (par exemple: liaisons éthyléniques, cycles aromatiques...).

Lorsque la réaction du polluant avec l'ozone est rapide (par exemple le phénol), l'apparition d'un taux d'ozone résiduel révèle la fin de la transformation du polluant d'origine. Si la réaction du polluant avec l'ozone est lente, l'apparition d'un taux d'ozone résiduel n'est pas suffisante, et il faut maintenir ce résiduel pendant un certain temps pour s'assurer de la fin des réactions. C'est la raison pour laquelle il peut être intéressant de mettre en série plusieurs réacteurs (ou chambres de contact) d'ozonation, (voir page 888).

Les conditions d'application de l'ozone en traitement d'eau de consommation ne permettent généralement pas l'oxydation des MO jusqu'à l'étape ultime (CO_2, H_20), qui permettrait de constater une élimination appréciable du COT. Mais cette transformation des MO par l'ozone conduit à des composés de plus faible masse molaire et plus polaires, dont la biodégradabilité est améliorée, bien que leur demande totale en oxygène soit diminuée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'efficacité de l'ozone vis-à-vis des composés aromatiques simples varie dans de grandes proportions et dépend de la nature des radicaux fixés sur le cycle aromatique.

L'ozone est particulièrement efficace pour l'élimination des phénols, des détergents, des hydrocarbures polycycliques, de certains pesticides (aldrine). D'autres pesticides, comme le lindane, ne peuvent être éliminés par l'ozone.

L'ozone permet aussi une réduction importante des précurseurs d'haloformes : il réduit donc le potentiel de formation de ces composés.

L'ozone permet d'éliminer de nombreux composés organiques sapides. Il faut cependant noter que si le taux de traitement appliqué est trop faible, la dégradation de certains produits organiques conduit à la formation de composés pouvant donner à l'eau une saveur (cétones, aldéhydes). Il importe, dans ce cas, d'augmenter le taux de traitement appliqué et le temps de contact à mettre en oeuvre pour aboutir à une eau de bonne qualité.

La dose d'ozone à mettre en oeuvre pour le traitement d'une eau donnée peut se déterminer par un essai en laboratoire (voir page 356).

Sur une installation industrielle, il est aussi possible de réguler la dose d'ozone introduite en fonction de l'absorption UV (brevet LE).

Figure 784. Installation de BEDOK (Singapour). Débit: 5 700 $m^3.h^{-1}$. Clarification - filtration avec ozonation.

1.5.4.2. Adsorption

L'adsorption est un traitement particulièrement efficace pour l'élimination des M0. L'efficacité en est d'autant plus importante que leur masse molaire est élevée et leur polarité faible. Le charbon actif permet l'élimination

- de nombreux composés sapides,
- des phénols,
- des tension-actifs,
- des hydrocarbures à chaînes saturées dont les molécules sont peu solubles et difficilement attaquables par l'ozone,
- des pesticides.

Il n'a qu'une faible efficacité vis-à-vis des solvants polaires et des composés organochlorés à faible masse molaire c'est ainsi que la filtration sur charbon

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

actif granulé ne permet pas d'éliminer les composés haloformes de façon satisfaisante.

Lorsque le charbon est utilisé en poudre (avant décantation), on peut espérer une élimination supplémentaire d'environ 10 % de l'oxydabilité au permanganate ou du COT. Le charbon en poudre peut également être utilisé, en cas de pollution accidentelle importante, pour "écrêter" la pointe de pollution.

Lorsque le charbon actif est utilisé en grains, les composés organiques sont parfaitement éliminés au moment de la mise en service du charbon neuf. Ensuite, le lit de charbon actif se sature progressivement, et l'on constate une baisse d'efficacité en fonction du temps de fonctionnement. Cette baisse d'efficacité dépend du nombre et de la nature des composés à retenir. Lorsque l'efficacité du charbon est jugée trop faible, il faut procéder à son remplacement ou à sa réactivation. Le temps qui s'écoule entre mise en service et régénération est appelée "durée de vie" du CAG.

Figure 785. Installation de VIRY-CHATILLON (Essonne) pour la Lyonnaise des Eaux. Débit: 4 000 $m^3.h^{-1}$. Filtration sur CAG

A titre indicatif, sur une eau de surface moyennement polluée, après clarification totale et pour une charge volumique de 6 vol/vol.h avec un même charbon actif de bonne qualité, utilisé en deuxième étage de filtration, les durées de vie relatives à différentes classes de composés organiques peuvent évoluer dans les fourchettes suivantes en traitement d'EP

- composés halo formes : 1 à 2 mois,
- oxydabilité au permanganate: 3 à 6 mois,
- détergent anionique: 3 à 6 mois,
-mauvais goûts: 3 à 4 ans.

Sur de nombreuses eaux, on constate que la quantité de MO éliminées par le seul charbon se stabilise après 6 mois de fonctionnement, à une valeur comprise entre 5 et 15 % de la teneur initiale de l'eau brute, compte non tenu des abattements réalisés dans les étages antérieurs de traitement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Cette élimination est due pour partie à la diffusion des composés organiques à l'intérieur des pores du charbon, et pour partie à l'activité biologique des microorganismes se développant dans le lit filtrant. Elle peut s'annuler en période d'eau froide.

Il existe de nombreux modèles tendant à prévoir la durée de vie d'un CAG donné vis-à-vis de l'élimination des MO, à partir d'un essai réalisé en laboratoire sur l'eau à traiter et avec le charbon qu'il est prévu d'utiliser. Le modèle LYONNAISE DES EAUX-DEGRÉMONT est basé sur l'adsorption du COT.

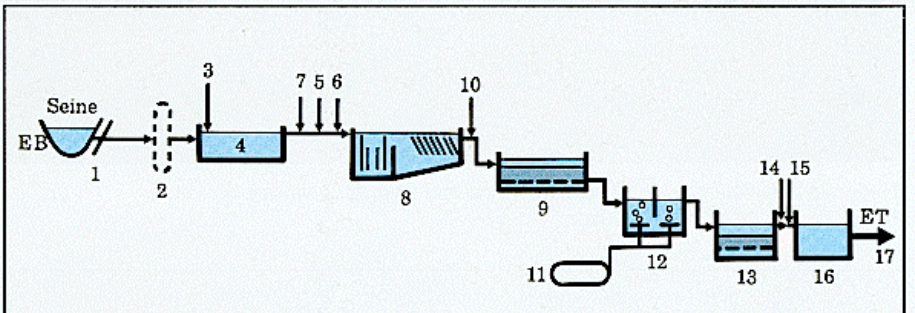
1.5.4.3. Traitement combiné ozone-charbon actif

C'est le traitement de choix pour l'éliminafion des M0. Utilisé sur de nombreuses installations modernes (NANTES, MORSANG, MONT-VALÉRIEN, BELGRADE, etc.), il permet de profiter, en les amplifiant, des avantages de chacune de ces deux techniques.

L'installation de MORSANG (2e et 3e phases) met en oeuvre ce procédé (figure 786).

En outre, l'ozone, en améliorant la biodégradabilité des composés organiques, soulage la fonction adsorption du charbon actif et la durée entre deux régénérations peut être allongée de 20 à 50 %.

l'adsorption du COT. tions peut être allongée de 20 à 50 %.



1. Dégrillage.
2. Macrotamisage 1,5 mm.
3. Préoxydation éventuelle.
4. Temps de contact.
5. Injection coagulant.
6. Injection adjuvant.
7. Charbon en poudre (sécurité en cas de pollution accidentelle).
8. Décanteur DENSADEG — Vitesse décantation lamellaire : 22,5 $m.h^{-1}$.
9. Filtration (6 filtres AQUAZUR V) — Vitesse de filtration : 13 $m.h^{-1}$.
10. Coagulant.
11. Ozoneur.
12. Ozonation.
13. Filtration sur CAG (6 filtres MEDIAZUR).
14. NaOH éventuelle (correction pH).
15. Désinfection.
16. Réservoir eau affinée — Temps de contact minimal 2 h.
17. Distribution.

Figure 786. Schéma de l'installation de MORSANG III (Essonne) pour la Lyonnaise des Eaux. Débit 3 800 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

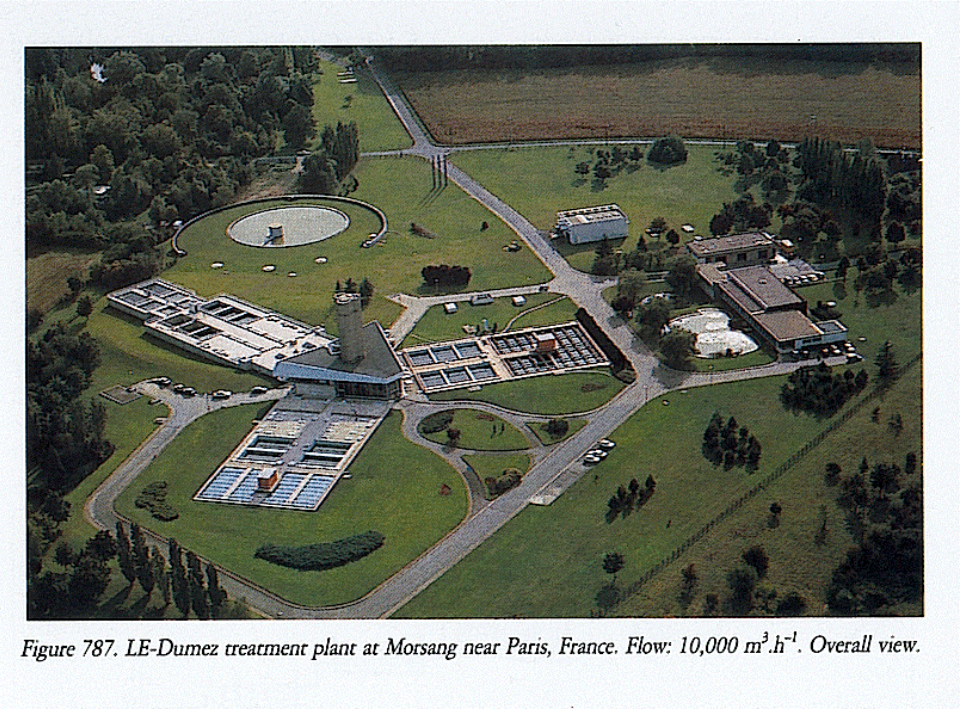


Figure 787. LE-Dumez treatment plant at Morsang near Paris, France. Flow: 10,000 $m^3.h^{-1}$. Overall view.

Figure 787. Installation de MORSANG (Essonne) pour la Lyonnaise des eaux. Débit: 10 000 $m^3.h^{-1}$. Vue générale.

1.6. LUTTE CONTRE LES MAUVAIS GOÛTS

1.6.1. Saveurs dues à la minéralisation de l'eau

La minéralisation de l'eau lui donne une saveur particulière: tel consommateur préfère le goût d'une eau douce, alors que tel autre préfère le goût d'une eau minéralisée; d'une façon générale, si un secteur de distribution est alimenté par deux eaux de minéralisation différente, le consommateur est constamment insatisfait et trouve souvent un "mauvais goût" à l'eau. La solution est alors de mélanger les eaux avant distribution si cela est possible, ou d'éviter d'alimenter un secteur alternativement avec des eaux d'origine différente.

1.6.2. Autres saveurs - Caractérisation

Il est avant tout nécessaire de rechercher si les mauvais goûts sont présents tout au long de l'année ou de façon saisonnière et, dans ce cas, s'il est possible de corréler leur présence, soit avec un phénomène naturel (croissance des algues, changement de température, pluviométrie, niveau d'eau dans un barrage), soit avec une activité humaine, agricole (épandage d'engrais, de pesticides) ou industrielle (campagne sucrière par exemple). Les mauvais goûts peuvent

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

également apparaître au cours d'une des phases de traitement d'une usine existante : stockage ou transport d'eau brute, décantation, oxydation...

Il est ensuite indispensable de bien caractériser les mauvais goûts constatés, soit par dégustation, soit par une analyse fine qui est coûteuse (couplage CG-SM). Cette recherche permet de déterminer si le(s) produits) à l'origine des mauvais goûts est/sont volatil(s), adsorbable(s) sur charbon actif granulé, ou destructibles) par oxydation. Un excès de chlore dans l'eau distribuée (> 0,15 $mg.l^{-1}$ environ) peut également constituer un désagrément pour le consommateur.

1.6.3. Traitements

- **Aération**

L'aération permet d'éliminer les mauvaises saveurs dues à la présence d'H_2S ou de certains composés organiques volatils (toluène, éthylbenzène).

- **Clarification**

Les étapes de décantation et filtration éliminent les mauvais goûts liés aux MES. Il faut en outre éviter des zones mortes dans les appareils de traitement, et veiller à ce qu'aucune zone ne se trouve en condition d'anaérobie, en particulier lorsque l'installation fonctionne à faible débit.

- **Charbon actif**

L'adsorption sur charbon actif est un traitement particulièrement adapté à l'élimination de nombreuses substances qui sont à l'origine de mauvais goûts. Le charbon peut être utilisé en poudre, si l'apparition des mauvais goûts est intermittente, à condition de pouvoir détecter l'arrivée des mauvais goûts dans l'eau brute. Dès que la dose de charbon dépasse une valeur moyenne de 15 - 20 $g.m^{-3}$ pour l'année, il devient intéressant d'utiliser le charbon actif granulé (CAG). Le CAG est utilisé en lit filtrant et représente une barrière constamment présente dans la filière de traitement.

- **Oxydation**

- La désinfection finale doit être étudiée avec soin pour éviter que cette étape nécessaire du traitement ne soit à (origine de mauvais goûts: la désinfection par le chlore peut provoquer l'apparition de goûts de chlorophénols s'il subsiste des traces de phénols dans l'eau. De même, si l'eau contient des bromures (ou des iodures), le chlore va les oxyder en brome (ou iode), qui réagit alors avec les précurseurs d'haloformes pour donner des bromoformes (ou des iodoformes) communiquant à l'eau un fort goût "pharmaceutique". Il est indispensable dans ce cas de prévoir une désinfection par le dioxyde de chlore.

- **L'oxydation intermédiaire** a pour but de détruire tout produit sapide. Par exemple, (ozone détruit les phénols, et l'eau peut ensuite être chlorée sans crainte des chlorophénols. De même, (ozone permet la destruction des précurseurs d'haloformes et évite la formation postérieure de composés haloformes sapides lors de la chloration.

D'une façon générale, (ozone est le plus efficace des oxydants pour la lutte contre les mauvais goûts. Cependant, la géosmine et les goûts dus aux pesticides chlorés ne sont pas éliminés complètement

Lorsque le ClO_2 est utilisé en désinfection finale, il ne faut pas chercher à obtenir un taux résiduel de ClO_2 jusqu'à (extrémité du réseau. En effet, le taux de traitement serait alors élevé et il apparaîtrait dans l'eau un goût métallique désagréable dû à la présence des ions ClO_2^-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Traitement combiné ozone-charbon actif** C'est le traitement de choix pour l'élimination des mauvais goûts. Il permet également de réduire la demande en chlore dans le réseau, et ainsi la dose finale injectée. Il est adopté sur un nombre croissant d'installations. La figure 788 - donne le schéma de l'installation de TOURS, qui traite une eau souterraine.

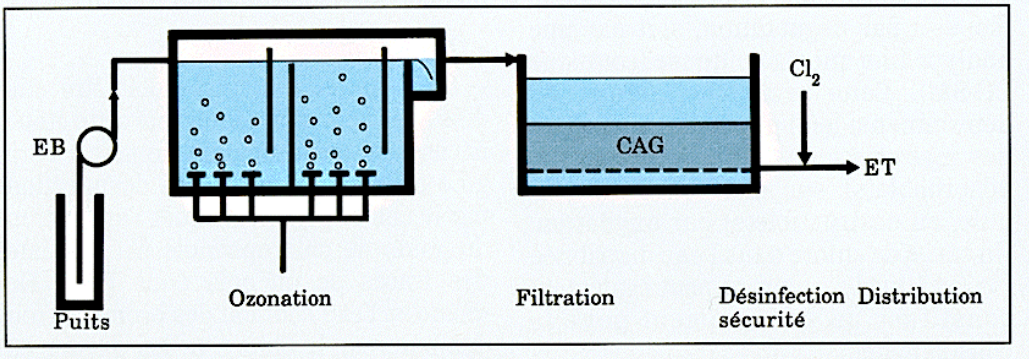


Figure 788. Schéma de l'installation de TOURS (Ile AUCARD) (Indre et Loire). Débit: 2 400 $m^3.h^{-1}$. 7 filtres MEDIAZUR, surface unitaire: 56 m^2.

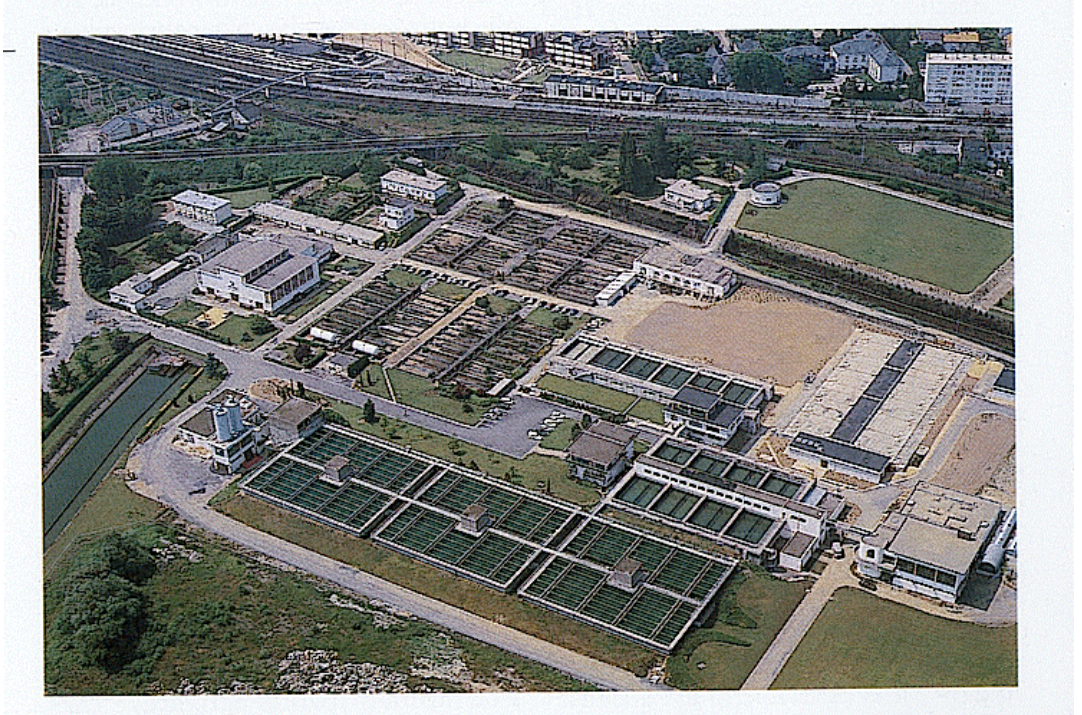


Figure 789. The Nantes treatment plant in western France. Flow: 11,700 $m^3.h^{-1}$. Taste removal from surface water. Ozone generators: 3 x 30 $kg.h^{-1}$. 10 Médiazur biflow filters, each with a surface area of 128 m^2.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 789. Installation de NANTES (Loire-Atlantique). Débit: 11700 $m^3.h^{-1}$. Élimination de mauvais goûts sur une eau de surface. Ozoneurs: 3 X 30 $kg.h^{-1}$. 10 filtres MEDIAZUR double flux, surface unitaire: 128 m^2.

1.7. RÉALIMENTATION DE NAPPE

Cette technique exige une nappe souterraine, géologiquement individualisée, dont l'alimentation naturelle, bien connue, est devenue insuffisante pour répondre aux besoins en eau de la région desservie.

La nappe de CROISSY en est un bon exemple (figure 790). La zone de drainage est constituée de craie blanche sénonienne, fissurée sur quelques dizaines de mètres d'épaisseur et recouverte d'alluvions récentes (sables et graviers). Elle est alimentée naturellement par

- des infiltrations d'eau de pluie de la zone géographique et de ses abords,
- des infiltrations de plus en plus réduites en raison de l'urbanisation,
- des écoulements sous-fluviaux de la Seine,
- des infiltrations à partir de la Seine.

La qualité de l'eau de la nappe s'est dégradée par suite de la pollution de l'eau de la Seine. En outre, l'urbanisation a créé une augmentation des besoins en eau: l'infiltration naturelle représente environ 30.10^6 m^3 par an alors que la quantité pompée est de 50.10^6 m^3 par an. Il a donc été nécessaire de mettre en oeuvre une réalimentation artificielle dont le but est à la fois de maintenir la qualité de l'eau souterraine, et de pouvoir disposer d'une quantité d'eau suffisante pour répondre aux besoins.

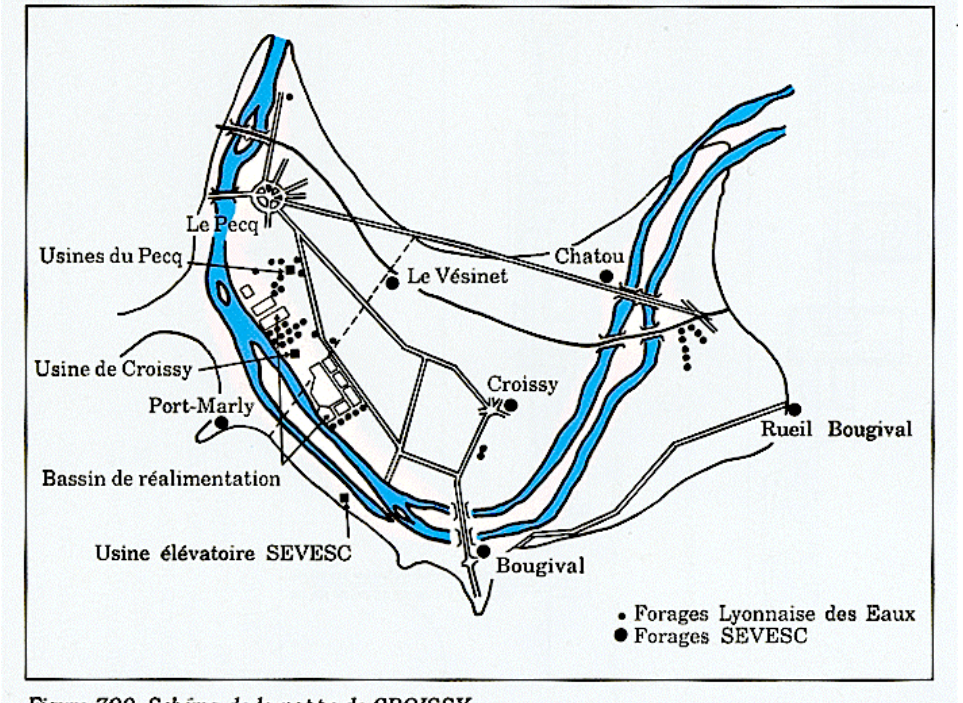
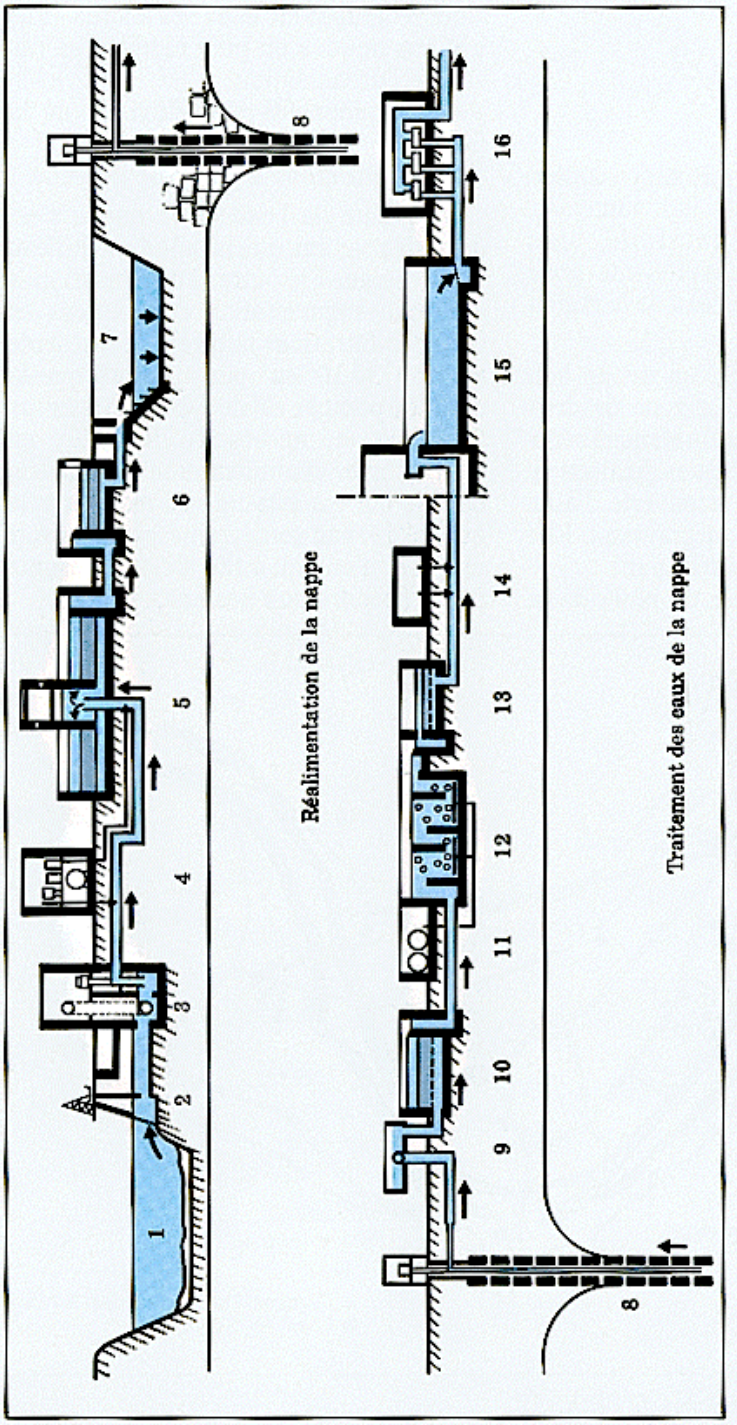


Figure 790. Schéma de la nappe de CROISSY.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 – La SEINE.
2 – Prise d'eau et dégrillage.
3 – Tamisage et pompage EB.
4 – Bâtiments réactifs.
5 – Décanteurs PULSATOR.
6 – Filtres AQUAZUR (sable).
7 – Bassins d'infiltration (1 m.j^{-1}).
8 – Pompage en forages.
9 – Aération et répartition.
10 – Déferrisation et nitrification sur NITRAZUR.
11 – Bâtiment des ozoneurs.
12 – Ozonation.
13 – Filtres à CAG.
14 – Chloration.
15 – Stockage ET.
16 – Pompage vers distribution.

***Figure 791.** Schémas de l'installation de réalimentation de CROISSY pour la Lyonnaise des Eaux (débit : 5 700 m^3.h^{-1}) et du traitement des eaux de la nappe (usine du PECQ pour la Lyonnaise des eaux. Débit : 6 100 m^3.h^{-1}).*

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La figure 791 schématise le système de réalimentation mis en place.

- **Avantages de la réalimentation de nappe**

Cette technique permet:

- l'élimination naturelle de tous les germes et bactéries pathogènes par la membrane biologique qui se développe dans le fond des bassins et par la percolation à travers le sol,
- la diminution de la teneur en MO assimilables contenues dans l'eau (action biologique des différentes phases du traitement), - la disponibilité d'une grande réserve d'eau de bonne qualité; la nappe joue le rôle de réservoir et la réalimentation n'est utilisée que lorsque la qualité de l'eau brute est la meilleure. En cas de pollution accidentelle, seule la réalimentation est interrompue, et la distribution peut être assurée à partir de l'eau de la nappe et des étages d'affinage. Pour chaque nappe, il est possible d'établir **un modèle mathématique** prenant en compte les différents facteurs (débit pompé, pluviométrie...), pour déterminer les besoins et le programme de la réalimentation (débit, durée de fonctionnement).

- **Entretien des bassins de réalimentation**

Lorsque la perte de charge dans un des bassins d'infiltration est trop grande (membrane biologique trop développée), le niveau s'élève. Il est nécessaire d'interrompre l'alimentation de ce bassin, qui s'assèche. Après déshydratation naturelle, la membrane est facilement éliminée, comme un tapis, pour être transportée hors du bassin. Cette opération perturbe peu la surface sableuse d'infiltration et la recharge ensable n'intervient qu'après plusieurs années de fonctionement

1.8. DÉSINFECTION

1.8.1. Définition

La désinfection est l'étape ultime du traitement de l'eau de consommation avant distribution. Elle permet d'éliminer tous les micro-organismes pathogènes de l'eau. Il peut subsister dans l'eau quelques germes banals, car la désinfection n'est pas une stérilisation (stérilisation destruction de **tous** les germes présents dans un milieu).

1.8.2. Effet bactéricide et effet rémanent

La désinfection des eaux comporte deux étapes importantes, correspondant à deux effets différents d'un désinfectant donné.

- **Effet bactéricide**: capacité de détruire les germes en une étape donnée du traitement.
- **Effet rémanent :** c'est un effet du désinfectant qui se maintient dans le réseau de distribution et qui permet de garantir la qualité bactériologique de l'eau. C'est à la fois un effet bactériostatique contre les reviviscences bactériennes et un effet bactéricide contre des pollutions faibles et ponctuelles survenant dans le réseau.

Le tableau suivant rappelle les qualités de chacun des désinfectants utilisés.

	O_3	$C1_2$	$C1O_2$	Chloramines	UV
Effet bactéricide	+++	++	++	+	++
Effet rémanent	0	+	+	++	0

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

NOTA: Le permanganate de potassium n'est pas utilisé comme désinfectant pour les installations collectives de distribution d'eau (sauf pour certaines opérations de nettoyage de conduite). Il est réservé à l'usage individuel.

1.8.3. Conditions générales pour une bonne désinfection

Pour être efficace, la désinfection doit être effectuée sur une eau de bonne qualité. La teneur en **matières en suspension** doit être aussi réduite que possible, et au maximum égale à 1 $mg.l^{-1}$. En effet, les bactéries et micro-organismes peuvent s'agglomérer sur les MES, qui les protègent de l'effet des désinfectants.

La teneur en **MO**, en **COT**, et surtout en **Carbone Organique Assimilable** (COA) doit être la plus faible possible. S'il subsiste une teneur trop importante de ces paramètres, l'eau va consommer le résiduel du désinfectant, ce qui permet la reviviscence éventuelle de bactéries. En outre, il sera difficile, voire impossible, de maintenir une teneur constante en désinfectant résiduel dans le réseau.

L'application d'un désinfectant à une eau conduit, dans de nombreux cas, à la formation de sous-produits de réaction qu'il importe de réduire, dans la mesure du possible. Il faut cependant que la recherche de cette réduction ne se fasse pas au détriment de l'efficacité de la désinfection elle-même.

1.8.4. Conditions d'application

Une bonne désinfection demande la combinaison d'un taux de résiduel C avec un temps de contact T ; c'est le facteur C.T :

$Cmg.l^{-1}$ X Tmin=Concentration X temps

L'efficacité relative de différents désinfectants vis-à-vis d'une bactérie donnée varie. Par exemple, la figure 792 donne les conditions (temps-concentration) pour éliminer 99,9 % d'une population d'Escherichia coli.

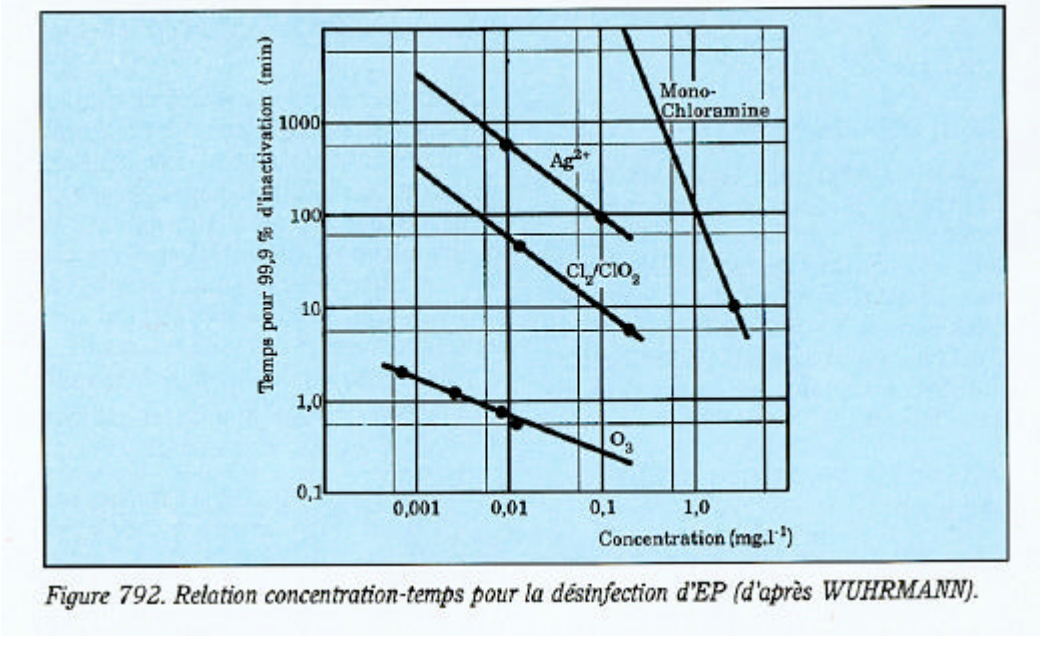


Figure 792. Relation concentration-temps pour la désinfection d'EP (d'après WUHRMANN).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Elle montre que l'ozone agit beaucoup plus rapidement que le chlore ou le dioxyde de chlore, et que la monochloramine a une action très lente.

De même, pour un même désinfectant, le C.T varie d'un micro-organisme à l'autre (figure 793).

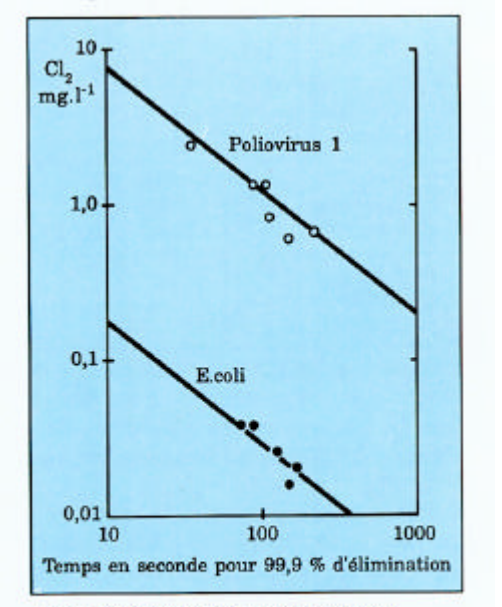


Figure 793. Désinfection par le chlore. Relation concentration-temps pour Escherichia coli et poliovirus l. pH : 6,6 — T : 5 °C (d'après SCARPINO).

Les conditions d'application de chacun des désinfectants doivent permettre une désinfection efficace, même si l'eau à désinfecter contient momentanément une certaine concentration en MES ou en MO qui pourrait perturber l'action du désinfectant utilisé. Dans la pratique, on recommande des conditions C et T pour chaque désinfectant.

1.8.4.1. Chlore

Le maintien d'un taux de 0,5 mg.l^{-1} de chlore libre, pendant un temps de contact de 30 min et à pH inférieur à 8, permet d'éliminer les bactéries pathogènes et les virus de la poliomyélite.

Au moment de la désinfection, il importe de vérifier qu'il ne subsiste pas dans l'eau certains composés organiques résiduels, dont la teneur est conforme à la législation en vigueur, ne donnant aucun goût à l'eau, mais qui peuvent réagir avec le chlore de désinfection et provoquer alors un goût désagréable.

1.8.4.2. Dioxyde de chlore

Le maintien d'un taux de 0,2 mg.l^{-1} pendant 15 min assure une protection efficace. L'effet rémanent est important. Il n'est pas souhaitable, et même interdit dans certains pays, d'utiliser une dose trop importante de ClO_2 pour la désinfection. L'action oxydante de ClO_2 sur les MO libère l'ion $C10_2^-$ qui a été reconnu comme toxique et communique à l'eau une saveur métallique désagréable.

1.8.4.3. Ozone

Le maintien d'un taux de 0,4 mg.l^{-1} pendant 4 min (C.T = 1,6) est recommandé pour (élimination des bactéries pathogènes et des poliovirus. Un C.T égal à 2 semble nécessaire pour assurer l'élimination complète des kystes de Giardia.

La désinfection par l'ozone exige que l'eau à ozoner ne contienne plus de manganèse soluble (Mn^{2+}). Si la teneur en Mn^{2+} est supérieure à 0,03 mg.l^{-1}, les conditions d'application de (ozone vont provoquer l'oxydation du manganèse en Mn (VII), ce qui donne une couleur rose à l'eau. Cette couleur évolue ensuite vers le brun-orange par suite de la précipitation de MnO_2,

De même, il faut vérifier que la couleur de l'eau à ozoner, liée à la teneur résiduelle

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

duelle en matière organique, ne provoque pas l'apparition d'un précipité après ozonation.

1.8.4.4. Chloramines

Elles ne sont pratiquement pas utilisées pour leur effet bactéricide, mais plutôt pour leur effet rémanent, tout particulièrement dans la distribution des eaux relativement chaudes (25 °C ou plus), car elles sont plus stables que le chlore à cette température. Dans les pays où il est demandé un fort taux de désinfectant résiduel au robinet du consommateur, et afin de réduire la teneur en haloformes, l'emploi des chloramines est appelé à se développer, après une désinfection effectuée principalement à l'ozone (effet bactéricide), et après une chaîne de traite

ment où l'oxydation est elle-même effectuée par ozonation en différents points de la chaîne.

1.8.5. Rayonnement UV

1.8.5.1. Principes généraux

- La désinfection d'une eau par rayonnement UV repose sur le principe d'une dose à appliquer pour obtenir un certain effet (par exemple un pourcentage d'élimination). Pour obtenir cette dose D, il faut appliquer une intensité dé radiation I pendant un temps donné t *: D = I.t.*

D mJ.cm^{-2} (ou mW.s/cm^2)

I mW.cm^{-2}

t s

- Par ailleurs, la variation du nombre N de micro-organismes survivants est donnée par une loi d'ordre

$$-\frac{dN}{dt} = kN$$

k constante dépendant de la dose et de la qualité de l'eau.

Cette relation exprime qu'une dose donnée permet d'éliminer un certain pourcentage d'un micro-organisme déterminé. Par exemple

- pour éliminer 90,0 %, il faut une dose appelée D_{10}),

- pour éliminer 99,0 %, il faut 2 D_{10}

- pour éliminer 99,9 %, il faut une dose 3 D_{10}.

La dose à appliquer (en lame mince) dépend fortement des micro-organismes à éliminer

Organismes	**Dose pour inhibition à 99,9 % (mW.s/cm^2)**
Escherichia coli	6
Pseudomonas aeruginosa	10
Spore de Bacillus subtilis	20

Escherichia coli est plus résistant que la plupart des entérobactéries. Il semble en être de même pour les poliovirus. Les algues et les protozoaires demandent une dose plus importante.

D'une manière générale, il est admis qu'une dose comprise entre 20 et 25 mW.s/cm^2 est suffisante pour obtenir une désinfection efficace en vue de la potabilisation. Des recherches sont en cours pour déterminer la dose d'inhibition d'autres organismes tels que Yersinia et Giardia: leur élimination pourrait demander des doses plus importantes que celles habituellement utilisées; la dose d'inhibition des kystes de Giardia serait de 150 mW.s/cm^2.

- Ces doses correspondent au rayonnement d'UV à 253,7 nm et non pas à la totalité du rayonnement.

1.8.5.2. Conditions de mise en oeuvre

- Les plus grandes efficacité et sûreté de la désinfection par W sont obtenues pour des eaux de bonne transmittance

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

(turbidité inférieure à 1 NTU).

- Le fer, les M0, et principalement les substances répondant à l'absorption W à 257 nm, ont une influence négative.
- La géométrie de l'appareil est importante: l'épaisseur de la lame d'eau ne doit pas dépasser quelques centimètres.
- Un nettoyage périodique des appareils est indispensable pour éliminer les matières (organiques ou minérales) déposées sur les lampes ou les verres quartz protecteurs. Une chambre de contact avec disposition verticale des lampes diminue les dépôts et favorise le nettoyage.
- Il est indispensable que les appareils soient équipés d'un système permettant de contrôler le vieillissement des lampes (baisse de l'intensité émise en fonction du temps) et de comptabiliser leur temps de fonctionnement.

1.8.5.3. Avantages et inconvénients

L'avantage incontestable de la désinfection par UV est que, pour les doses utilisées, il n'y a formation d'aucun produit de réaction avec les MO de l'eau.

Cet avantage est accompagné de deux inconvénients majeurs

- Il n'y a pas de possibilité d'apprécier de façon immédiate l'efficacité du traitement par la mesure d'un résiduel, comme dans le cas d'un oxydant chimique.
- Il n'y a pas d'effet rémanent. L'emploi de la désinfection UV est donc réservé à la désinfection d'eaux dont le réseau de distribution est court et bien entretenu. Dans d'autres cas, il est nécessaire de compléter la désinfection par l'injection d'un désinfectant à effet rémanent (chlore, dioxyde de chlore, chloramine), ce qui réduit considérablement l'avantage des UV.

1.9. TRAITEMENT DES BOUES

1.9.1. Nature des boues

Les boues résultant du traitement des eaux destinées à l'alimentation proviennent d'extractions ou purges effectuées au stade de la décantation, si elle existe, et du lavage des filtres.

Les MES contenues dans ces boues comprennent des matières présentes dans l'eau avant traitement: plancton, matières minérales et organiques floculées, hydroxydes métalliques (fer, manganèse) et des matières ajoutées à l'occasion du traitement: hydroxydes métalliques provenant du coagulant ainsi qu'éventuellement CAP, bentonite...

Dans le cas d'une décarbonatation à la chaux, elles peuvent également contenir une quantité importante de carbonate de calcium.

1.9.2. Cas d'une coagulation sur filtre

La concentration moyenne en MES des eaux de lavage des filtres peut varier de 200 à 1500 $g.m^{-3}$.. Il est nécessaire de mettre en couvre un ouvrage d'épaississement capable de donner des boues dont la teneur en MES soit au minimum de 20 $g.l^{-1}$ pour qu'elles puissent être ensuite déshydratées. Le DENSADEG est particulièrement bien adapté à cet effet.

1.9.3. Cas d'un traitement complet,

avec coagulation, floculation, séparation (décantation ou flottation) et filtration.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

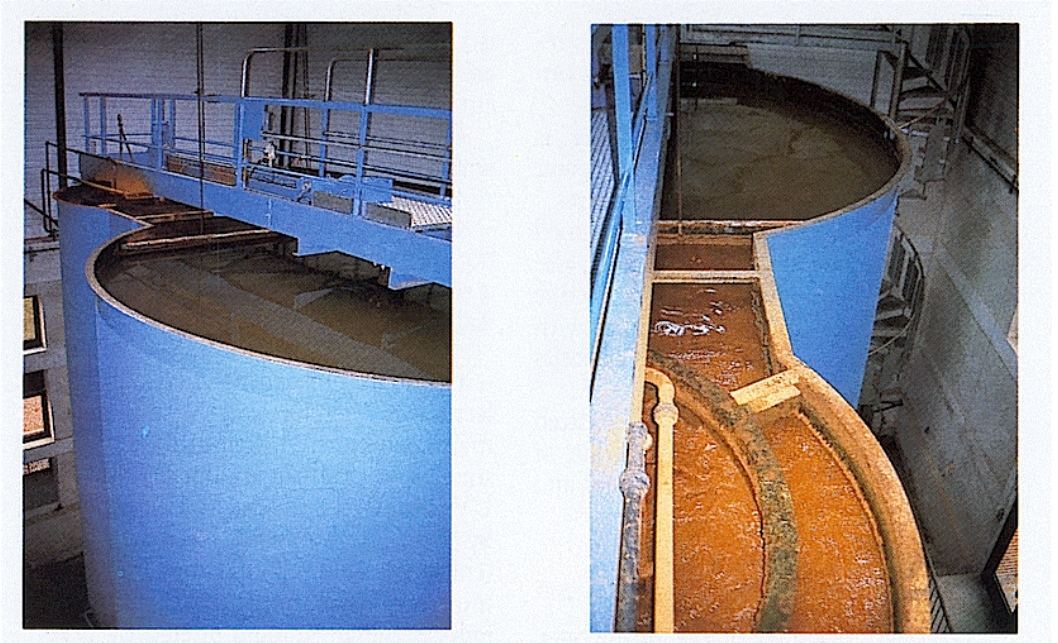


Figure 794. Les Ansereuilles plant in northern France for Société des Eaux du Nord. Thickening of iron removal sludge by Densadeg RP unit (flow: 200 $m^3.h^{-1}$).

Figure 794. Installation des ANSEREUILLES (Nord) pour la Société des Eaux du Nord. Épaississement des boues de déferrisation, par DENSADEG RP, débit: 200 $m^3.h^{-1}$.

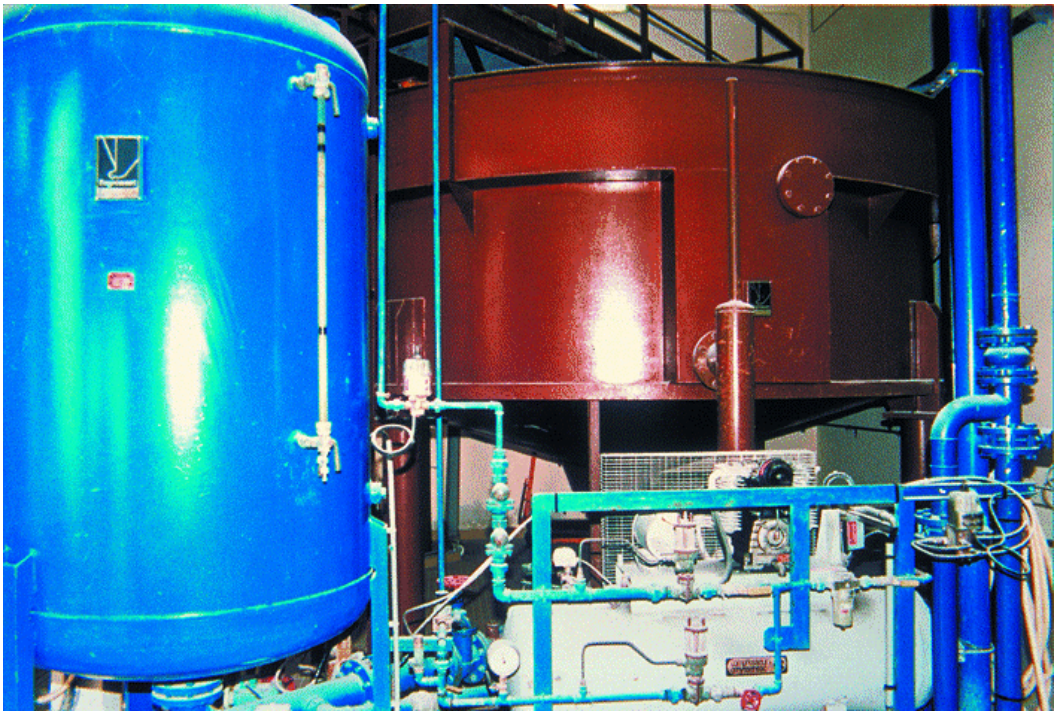


Figure 795. Installation de CHOLET (Maine-et-Loire). Traitement de boues d EP, par flottation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

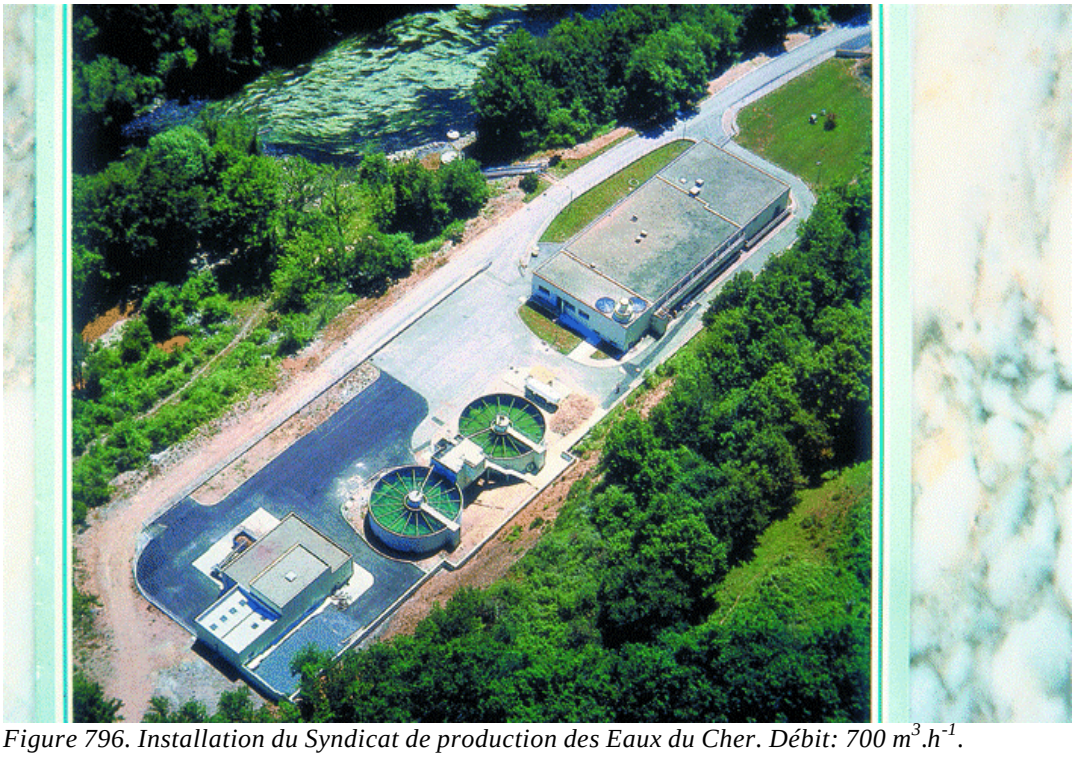


Figure 796. Installation du Syndicat de production des Eaux du Cher. Débit: 700 $m^3.h^{-1}$.

Figure 797. Installation du Syndicat de Production des Eaux du Cher. Déshydratation des boues par filtre à bande presseuse.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Ces installations comportent deux types de boues

- **les eaux de lavage des filtres**. Ces eaux sont stockées dans un bassin dont le volume correspond au volume des eaux de lavage de 1, ou mieux, 2 filtres. Elles sont ensuites pompées en continu et à faible débit en tête de station avant coagulation. Le débit moyen continu est généralement compris entre 1 et 3 % du débit total de l'installation et cette recirculation n'amène pas de gêne au fonctionnement de la clarification.

- **les boues extraites de l'étape de séparation.** Le volume de ces boues dépend de la nature de l'eau et des techniques de séparation utilisées. Il représente en moyenne de 0,5 à 2 % du volume traité. S'il n'est pas possible d'évacuer les boues vers l'égout urbain, leur traitement sur place doit être envisagé selon les techniques d'épaississement et de déshydratation qui sont développées au chapitre 19. Lorsque le coagulant est du sulfate d'aluminium, on peut, dans certains cas, envisager sa récupération (acidification).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. TRAITEMENTS SPÉCIFIQUES

2.1. ÉLIMINATION DU FER

2.1.1. États naturels du fer

Dans les eaux de surface, le fer se trouve généralement sous forme ferrique et précipitée, souvent associé aux MES. On le rencontre également sous forme ferreuse dans les couches profondes de certaines réserves d'eau en l'absence d'oxygène, ou dans les eaux souterraines. Le fer réduit (Fe^{2+}) est alors dissous et souvent complexé.

. Le fer ferreux est soit sous forme Fe^{2+}, soit sous forme d'ions hydratés: $FeOH^+$ ou $Fe(OH)_3^-$. Dans les eaux dont le TAC est notable, l'ion Fe^{2+} se rencontre surtout à l'état d'hydrogéno-carbonate (ou bicarbonate) et sa solubilité, déduite des lois régissant les équilibres chimiques, suit les relations

$$FeCO_3 \rightleftarrows Fe^{2+} + CO_3^{2-} \text{ avec } [Fe^{2+}].[CO_3^{2-}] = K'_{FeCO_3}$$

$$HCO_3^- \rightleftarrows H^+ + CO_3^{2-} \text{ avec } \frac{[H^+].[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = K'_2$$

d'où :

$$[Fe^{2+}] = \frac{K'_{FeCO_3}}{K'_2} \cdot \frac{[H^+]}{[HCO_3^-]} \# \frac{[H^+]}{[HCO_3^-]}$$

En présence d'H_2S la solubilité est plus faible (à cause de la faible valeur du produit de solubilité du sulfure ferreux qui, de ce fait, précipite).

- **Le fer complexé.** Il s'agit de complexes faisant intervenir Fe^{2+} ou Fe^{3+}

- minéraux: silicates, phosphates ou polyphosphates, sulfates, cyanures...

- organiques: il pourra s'agir, en réalité, de phénomènes de complexation proprement dite, de chélation ou peptisation, en particulier avec les acides humiques, fulviques, tanniques...

Remarque: le fer est souvent associé au manganèse (§ 2.2) et/ou à l'ammonium (§ 2.3).

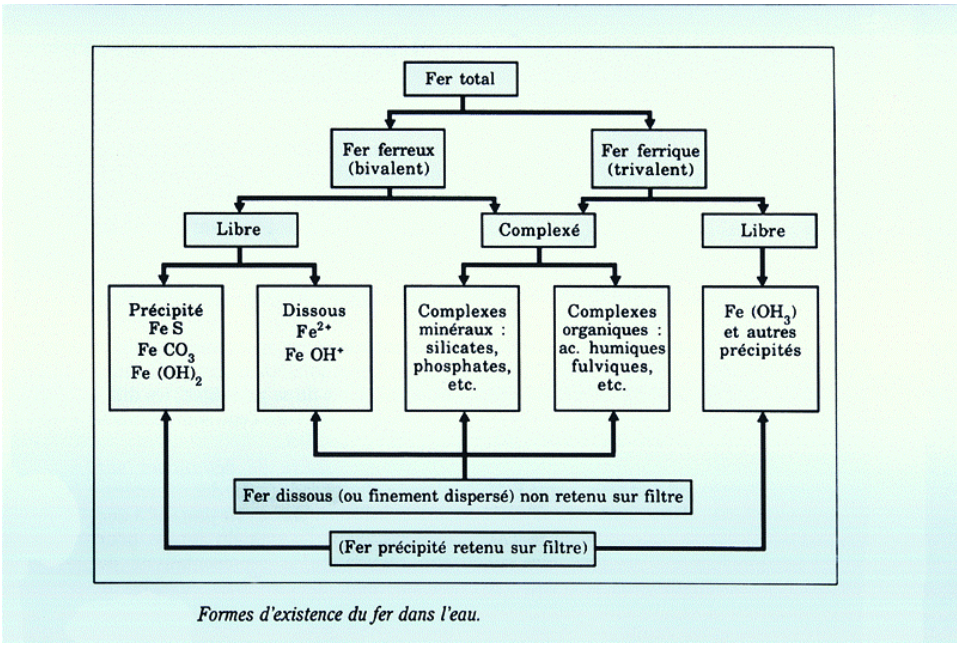
Pour définir un traitement de déferrisation, il ne suffit donc pas de connaître la teneur totale en fer, mais aussi les différentes formes sous lesquelles cet élément est susceptible de se présenter; les différents états du fer dans l'eau sont résumés dans la figure 798.

Il est nécessaire de déterminer sur place la plus grande partie des caractéristiques de l'eau, après avoir procédé à une exploitation suffisante du forage pour être certain de la représentativité de l'échantillon. Il est indispensable de mesurer ainsi: pH, potentiel redox, O_2 dissous, (CO_2), libre.

En pratique, le problème est déjà bien défini si l'on tonnait : fer total, fer total dissous, Fe^{2+} total, Fe^{2+} dissous; l'élimination des formes dissoutes pose des problèmes, surtout en présence de fer complexé. Dans le cas d'impossibilité de procéder à des analyses détaillées sur le terrain, on peut supposer la présence de complexes, donc de difficultés de traitement, si la teneur totale en fer dissous est supérieure à la valeur de la solubilité théorique, déduite du pH et de l'alcalinité à partir des relations précédentes.

La forme du fer dans l'eau dépend avant tout du pH et du potentiel d'oxydoréduction; sur la figure 799, on voit qu'il est possible de passer d'une forme dissoute du fer (par exemple Fe^{2+} ou $FeOH^+$) à une forme précipitée ($FeCO_3$, $Fe(OH)_2$ ou

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



Formes d'existence du fer dans l'eau.

$Fe(OH)_3$) en élevant soit le potentiel (oxydation), soit le pH, soit les deux à la fois. C'est sur ces principes que sont fondés les différents traitements physico-chimiques envisageables.

Par ailleurs, un examen au microscope est également recommandé pour déterminer l'absence ou la présence de bactéries du fer.

2.1.2. Déferrisation physico-chimique

Cette technique, avec oxydation à l'air et filtration, a longtemps été la plus couramment utilisée, en particulier pour les eaux de forage. Éventuellement, on peut y ajouter un certain nombre de traitements supplémentaires tels que: correction de pH, oxydation chimique, décantation... Il est toujours utile d'aérer une eau d'origine profonde dépourvue d'oxygène, même si on utilise également un oxydant chimique. Cette aération est nécessaire si l'eau contient du H_2S,

L'ozone est l'oxydant chimique de choix qui permet une bonne oxydation du fer. Au cas où l'eau contient une forte proportion de MO ou de manganèse, il faut déterminer avec soin la dose à introduire.

2.1.2.1. Déferrisation simple sans décantation (aération-filtration)

- **Principe**

Ce procédé concerne les eaux brutes dont la teneur maximale en fer est de 5 $mg.l^{-1}$ et qui ne présentent, par ailleurs,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

pas d'autres caractéristiques défavorables: manganèse, couleur, turbidité, acides humiques; une faible teneur en ammonium et une agressivité carbonique modérée peuvent être tolérées. Dans certains cas, on peut traiter de la même façon des eaux dont la teneur en fer atteint 10 mg.l^{-1}.

Le premier stade du traitement de déferrisation est alors basé sur une oxydation du fer divalent par l'oxygène de l'air. Cette aération peut se faire soit à la pression atmosphérique, soit sous pression (voir page 877). L'avantage des installations du second type réside dans la possibilité de travailler sous la pression de refoulement dans le réseau sans pompage de reprise. Par contre, l'aération à la pression atmosphérique permet souvent d'évacuer à moindres frais du gaz carbonique agressif, qui demande un traitement coûteux de neutralisation lorsque sa teneur est élevée.

La rapidité de l'oxydation du fer divalent par l'oxygène dépend de plusieurs facteurs, en particulier: température, pH,

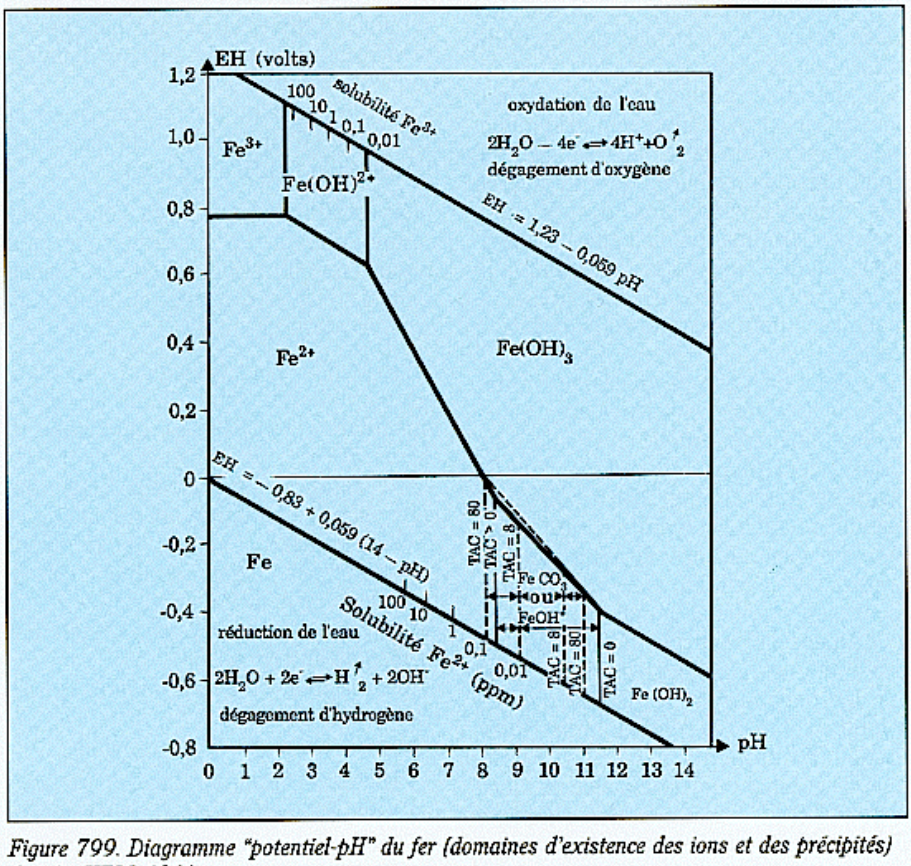


Figure 799. Diagramme "potentiel-pH" du fer (domaines d'existence des ions et des précipités) d'après HEM, 1961.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

teneurs en fer et en oxygène dissous. La réaction peut s'écrire:.

$$4\,Fe^{2+} + O_2 + 8\,OH^- + 2H_2O \rightarrow 4\,\underline{Fe(OH)_3}\downarrow \quad (1)$$

et sa cinétique s'exprime par la relation de STUMM et LEE :

$$-\frac{d(Fe^{2+})}{dt} = k.(Fe^{2+}).(OH^-)^2.P_{O_2} \qquad (2)$$

P_{o2} est la pression partielle d'oxygène et k une constante fonction de la température et du pouvoir tampon de l'eau brute.

L'équation (2) montre que la réaction est d'autant plus rapide que le pH est plus élevé et que l'eau est plus proche de la saturation en oxygène. Le temps d'oxydation déterminé en laboratoire sur une eau synthétique peut se trouver considérablement diminué sur la plupart des installations, grâce à certains effets catalytiques dus principalement aux dépôts antérieurs. Certains phénomènes biologiques, étudiés plus loin, vont dans le même sens. Par contre, la présence d'acides humiques retarde l'oxydation du fer.

La taille effective du matériau filtrant peut se trouver comprise entre 0,5 et 1 mm et la vitesse entre 5 et 15 $m.h^{-1}$. Le poids de fer retenu par unité de surface filtrante est très variable: 2 00 à 1000 g Fe par m^2. de sable, suivant les cas. D'une manière générale, les filtres bicouches (anthracite + sable) sont particulièrement bien adaptés à la déferrisation.

Certaines substances, comme les acides humiques, les silicates, les phosphates, les polyphosphates, jouent un rôle inhibiteur dans l'oxydation, la précipitation ou la filtration de l'hydroxyde ferrique. C'est ainsi que la présence de silice conduit à la formation du complexe $FeSiO(OH)_3^{2+}$, stable en milieu alcalin, alors que l'élévation du pH est, par ailleurs, nécessaire pour l'oxydation et l'hydrolyse du fer.

teurs, néc

On peut combattre ces effets par des traitements complémentaires: oxydation (permanganate de potassium, ozone), coagulation (sulfate d'alumine) ou floculation (alginate) suivant le cas

- **Mise en oeuvre**

Le type le plus courant est celui de **l'installation sous pression** représentée par la figure 538 et qui comporte

- une tour d'oxydation comprenant un lit de lave volcanique très dure et poreuse qui divise l'eau et lui assure, par contact avec l'air, une grande surface d'oxydation,
- un filtre lavable par retour d'eau et insufflation d'air. Ce filtre peut être combiné avec la tour d'oxydation.

Les stations gravitaires comportent une aération à la pression atmosphérique suivie d'une filtration ouverte ou fermée (dans ce dernier cas, avec ou sans pompage de reprise).

L'oxydation peut également être réalisée par l'ozone, comme dans le cas de l'installation de CRISSEY qui comporte (figure 800)

- une aération par cascade. Cette cascade est mise en oeuvre au-dessus de la cuve d'ozonation et permet une première oxydation par l'ozone résiduel s'échappant de la cuve d'ozonation,
- une cuve d'ozonation pour l'oxydation principale du fer,
- une injection d'alginate pour améliorer les qualités du floc,
- une filtration sur filtre bicouche,
  - vitesse de filtration: 7 $m.h^{-1}$,
  - sable TE = 0,5 mm, H = 0,4 m,
  - hydroanthracite TE = 0,85 mm, H = 0,5 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

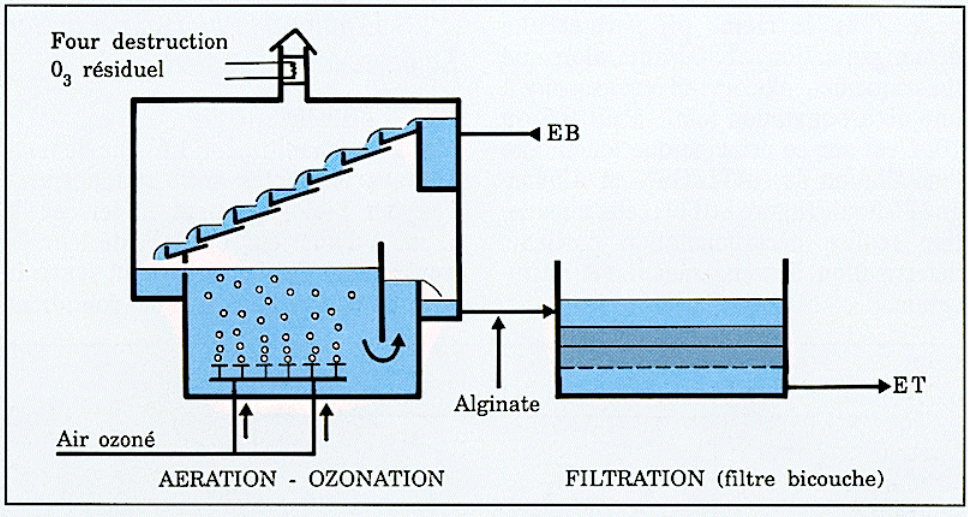


Figure 800. Installation de CRISSEY, (Saône-et-Loire) pour le Syndicat du Nord. Débit: 300 $m^3.h^{-1}$. Schéma de l'installation.

2.1.2.2. Déferrisation avec décantation

Il est nécessaire d'intercaler une décantation entre l'aération et la filtration dans les cas suivants

- dose de fer élevée dans l'eau brute, conduisant à un volume de précipité excessif,
- présence de couleur, de turbidité, d'acides humiques, d'agents complexants, etc., provoquant une diminution importante de la cinétique d'oxydation et de précipitation du fer, et/ou impliquant l'adjonction d'un coagulant (sulfate d'aluminium ou chlorure ferrique) à une dose supérieure à une dizaine de $g.m^{-3}$ de produit commercial.

Les procédés de décantation à contact de boues conviennent alors tout particulièrement au traitement de ces eaux. Une aération doit obligatoirement précéder la décantation si l'eau brute est dépourvue d'oxygène.

2.1.2.3. Traitement associé à une décarbonatation

La décarbonatation à la chaux, génératrice d'un pH élevé, est favorable à l'élimination du fer et du manganèse. Ainsi, la précipitation du carbonate ferreux est pratiquement totale à pH 8,2 et celle de l'hydroxyde ferreux à pH 10,5 (figure 801 a). En présence d'un potentiel redox élevé, le fer (II) dissous peut être précipité sous forme de $Fe(OH)_3$

$$Fe^{2+} + 3\ H_2O \rightarrow \underset{\downarrow}{Fe(OH)_3} + 3\ H^+ + e^-$$

Pour le manganèse, les pH de précipitation sont voisins de 9,2 pour le carbonate et de 11,5 pour l'hydroxyde, respectivement

Une décarbonatation partielle, à pH voisin de 8, peut donc entraider une déferrisation complète. Dans certains cas, en particulier dans les appareils à décarbonatation catalytique (GYRAZUR, voir

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

page 673), le même pH permet une démanganisation satisfaisante, alors que théoriquement elle devrait être associée à une décarbonatation totale à pH 9,5 ou 10. C'est sur ce principe que fonctionne l'installation de RATINGEN en Allemagne Fédérale (figure 801 b) : cette installation réalise décarbonatation partielle, déferrisation, démanganisation et nitrification.

2.1.3 Élimination biologique du fer Le procédé FERAZUR

2.1.3.1. Principe

On a vu (chapitre 2, § 1.6) que de nombreuses bactéries sont susceptibles d'oxyder biologiquement le fer, en le fixant à l'intérieur ou à l'extérieur de leurs gaines. Ces bactéries sont susceptibles de se développer dans des conditions

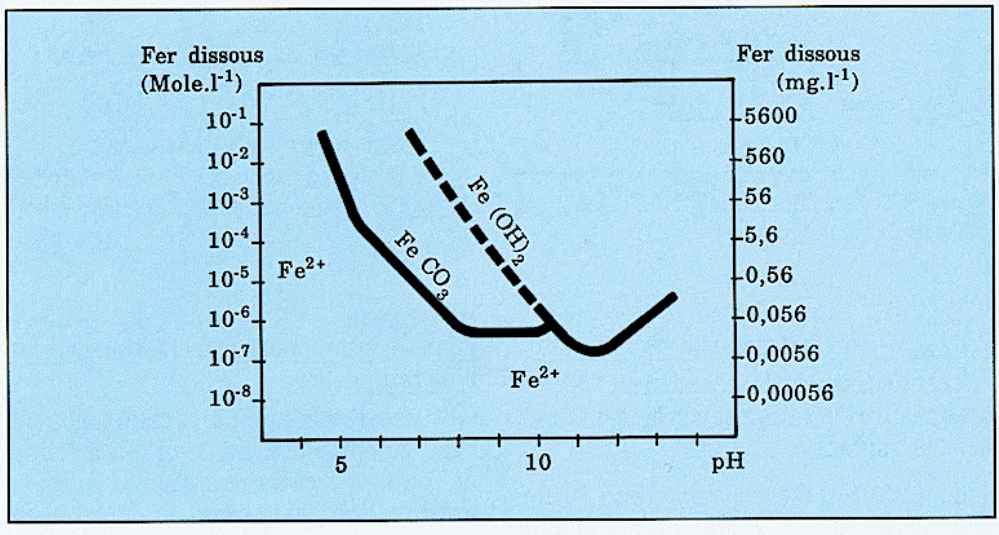
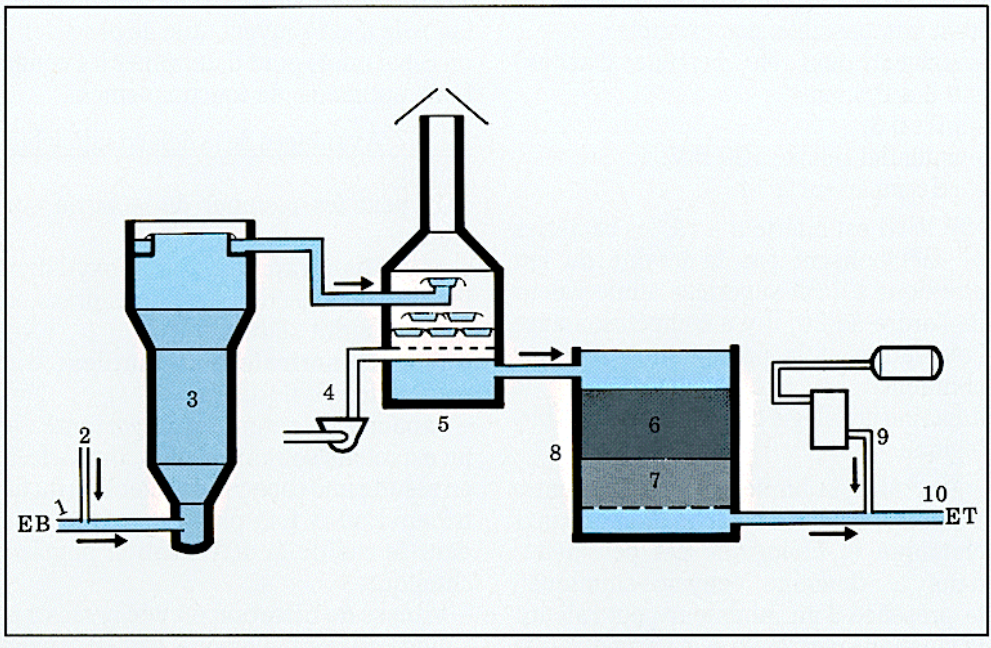


Figure 801 a. Solubilité du fer en fonction du pH dans une eau d'alcalinité moyenne.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 – Arrivée d'eau brute.
2 – $Ca(OH)_2$.
3 – GYRAZUR (décarbonatation).
4 – Ventilateur (air).
5 – Aération.
6 – Anthracite.
7 – Sable.
8 – Filtration (bicouche).
9 – Cl_2.
10 – Eau traitée.

Figure 801 b. Installation de RATINGEN (RFA). Débit : 1 000 $m^3.h^{-1}$. Schéma de principe de l'installation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

où l'oxydation physico-chimique du fer n'est pas possible, par exemple

- concentration en oxygène dissous 0,2 à 0,5 $g.m^{-3}$,
- pH: 6,3,
- potentiel redox : 100 mV,
- rH: supérieur à 14.

Si le rH est inférieur à 14, les bactéries ne métabolisent pas la totalité du fer, alors que s'il est supérieur à une valeur de l'ordre de 20, il y a compétition avec l'oxydation et la précipitation physico-chimique. La figure 802 définit le domaine privilégié de la déferrisation biologique.

En réalité, la limite de séparation entre les domaines de la déferrisation physico-chimique. et biologique est peu nette dans le domaine "physico-chimique", la présence d'un inhibiteur peut ralentir la cinétique d'oxydation et permettre à la déferrisation biologique d'être le processus prédominant. C'est la raison pour laquelle il est souvent utile de procéder à un essai pilote pour déterminer les conditions optimales de fonctionnement.

2.1.3.2. Avantages de la déferrisation biologique

On peut les résumer de la façon suivante

- **oxydation rapide:** tour d'oxydation inutile. Une injection d'air sous pression en ligne suffit souvent,
- **réactifs normalement inutiles:** correction de pH, floculant,
- **capacité de rétention importante:** le fer est retenu sous forme très compacte. Il en résulte une capacité de rétention du filtre environ 5 fois plus importante que dans le cas de la déferrisation physico-chimique.
- **vitesse de filtration élevée:** grâce à la solidité du floc biologique, tout en conservant des durées de cycle de filtration

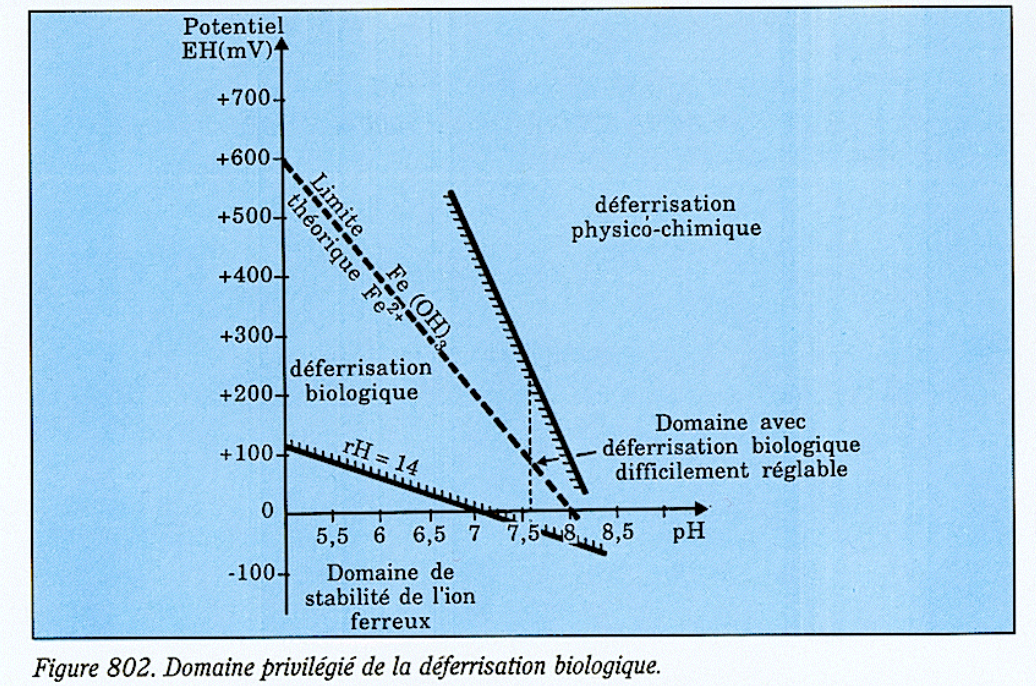


Figure 802. Domaine privilégié de la déferrisation biologique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

importantes. Ces vitesses peuvent aller, dans certains cas, jusqu'à 40 $m.h^{-1}$, voire 50 $m.h^{-1}$,

- **lavage économique:** le pourcentage d'eau de lavage est environ cinq fois plus faible que dans le cas de la déferrisation physico-chimique et, dans certains cas, il est possible de laver les filtres à l'eau brute. Il est par contre recommandé de ne pas laver les filtres à l'eau traitée chlorée, ce qui pourrait détruire partiellement la population de bactéries déferrisantes,
- **traitement des boues facilité:** boues compactes.

2.1.3.3. Mise en oeuvre

Une installation de déferrisation biologique comprend (cf. figure 803) - un système d'aération ménagée (1).

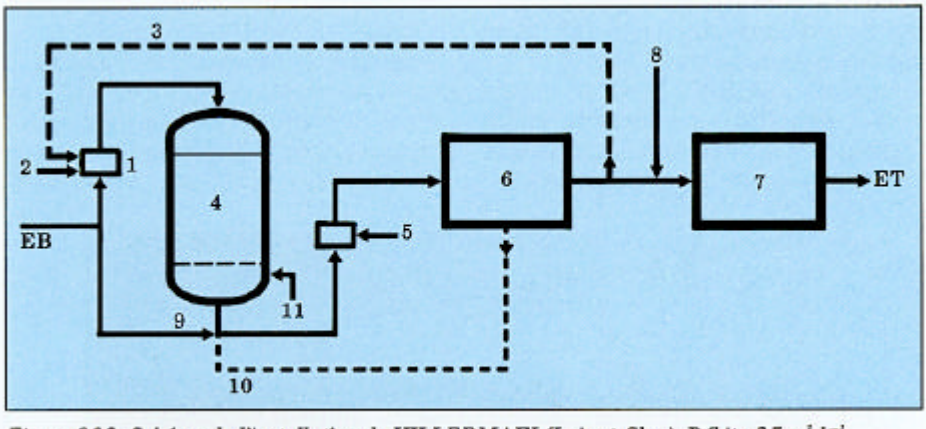


Figure 803. Schéma de l'installation de VILLERMAIN (Loir-et-Cher). Débit : 35 $m^3.h^{-1}$. Déferrisation biologique sous pression.

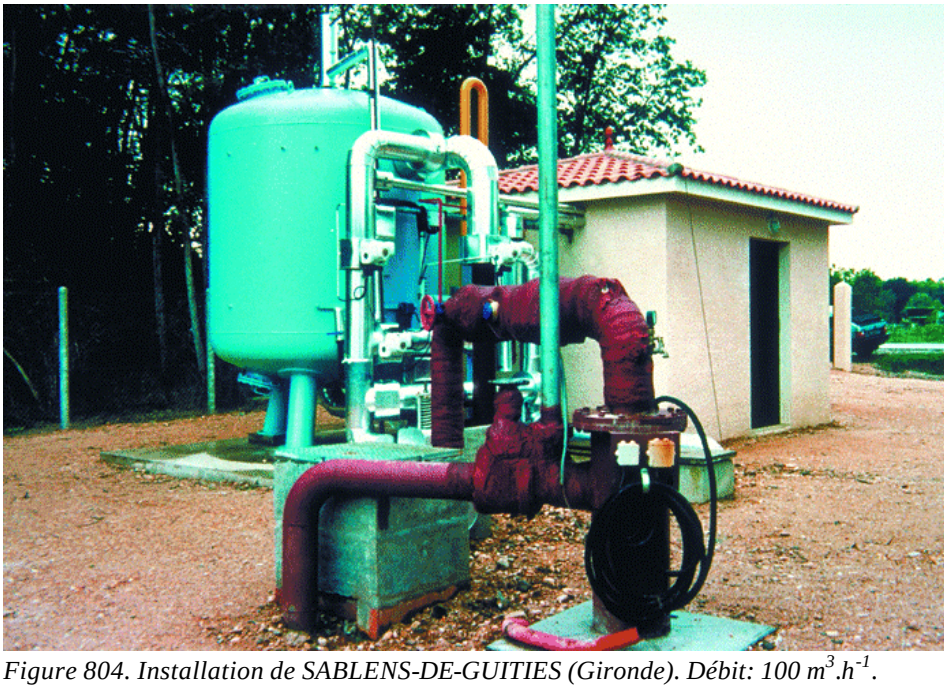


Figure 804. Installation de SABLENS-DE-GUITIES (Gironde). Débit: 100 $m^3.h^{-1}$. Déferrisation biologique sous pression.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Cette aération peut être réalisée soit dans un pot de dissolution pour les installations sous pression avec injection d'air (2), soit par recirculation d'une partie de l'eau traitée aérée (3). Dans le cas de traitement d'une eau contenant du H2S, il est souhaitable de mettre en oeuvre une aération par cascade. L'importance de la cascade doit être suffisante pour permettre l'élimination du H_2S, sans toutefois augmenter la concentration en 0_2 dissous de manière trop importante.

- un réacteur FERAZUR (4),
- un système d'aération complémentaire (5) pour porter la teneur en oxygène à la valeur convenable pour distribution,
- une citerne d'eau de lavage, non chlorée (6),
- une citerne d'eau traitée (7), après chloration (8),
- un ensemble de lavage comprenant, soit le lavage à l'eau brute (9) ou à l'eau traitée (10) et un surpresseur de lavage (11).

La filtration peut aussi s'effectuer gravitairement en filtres ouverts comme pour l'installation de LOME (figure 805).

Remarque: le démarrage d'une installation de déferrisation biologique est moins rapide que dans le cas d'un traitement physico-chimique. Il demande un temps généralement compris entre 1 et 10 jours.

Figure 805. Installation de LOMÉ (Togo). Débit: 2200 $m^3.h^{-1}$. 4 filtres de 24,5 m^2. Déferrisation biologique gravitaire.

2.2. ÉLIMINATION DU MANGANÈSE

2.2.1. État naturel

Le manganèse est un élément très souvent présent dans les sols. On peut rencontrer de nombreux minerais de manganèse, généralement des oxydes et quelquefois des carbonates.

Dans les eaux naturelles, le manganèse est généralement présent sous forme soluble ionisée Mn^{2+} et $MnOH^{+}$. Il peut

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

former des complexes avec les bicarbonates, les sulfates et silicates présents en même temps, ainsi qu'avec certaines M0. Le manganèse est souvent présent dans les eaux naturelles en association avec le fer et l'ammonium. Mais il existe aussi des cas où le manganèse est présent seul.

2.2.2. Élimination physico-chimique du manganèse

La figure 806 présente le diagramme potentiel redox-pH des formes les plus usuelles du manganèse.

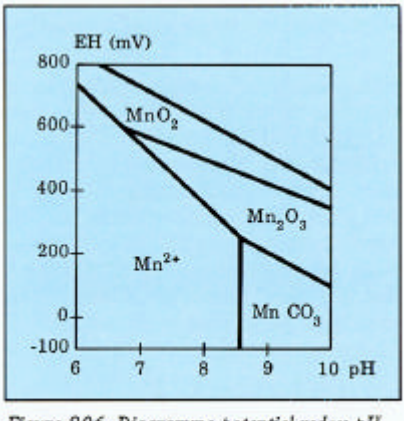


Figure 806. Diagramme potentiel redox-pH du manganèse.

2.2.2.1 Oxydation par l'oxygène

Le manganèse Mn^{2+} est très lentement oxydable par l'oxygène. MORGAN propose la relation

$$-\frac{d(Mn^{2+})}{dt} = K_0.(Mn^{2+}) + K.(Mn^{2+}).(MnO_2)$$

avec : $K = K'.P_{O_2}.(OH^-)^2$

L'oxydation par l'oxygène n'atteint une vitesse appréciable que pour un pH supérieur à 9,5 (figure 807). L'oxydation de Mn^{2+} par l'oxygène dépend de la température: elle est cinq fois plus rapide quand on passe de 11 °C à 22 'C; mais aux pH habituels, les temps de contact restent difficilement compatibles avec une exploitation industrielle.

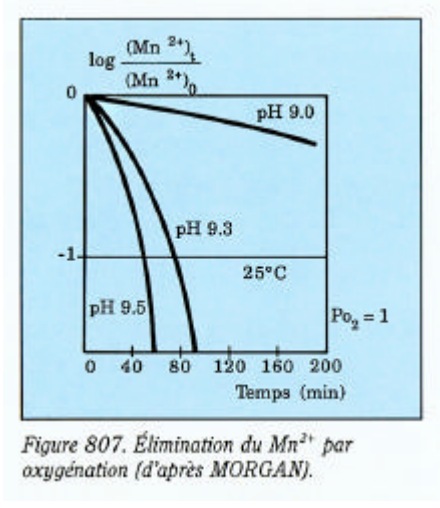


Figure 807. Élimination du Mn^{2+} par oxygénation (d'après MORGAN).

La présence de dioxyde de manganèse "catalyse" la réaction. C'est ce qui est observé sur certaines installations, après un certain temps de fonctionnement avec d'autres oxydants ayant conduit à la "manganisation" du sable filtrant.

En réalité, il y aurait adsorption de Mn^{2+} sur MnO_2 et l'oxydation lente du Mn^{2+} en MnO_2 peut alors se poursuivre in situ selon la suite de réactions

$$Mn^{2+} + MnO_2 \xrightarrow{\text{rapide}} MnO_2.Mn^{2+}$$

$$MnO_2.Mn^{2+} + O_2 \xrightarrow{\text{lent}} 2\ MnO_2$$

Un sable manganisé, c'est-à-dire enrobé de $Mn0_2$, peut servir de support à cette réaction, mais cette manganisation est difficilement contrôlable. On a constaté,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

dans certains cas, l'impossibilité de l'obtenir même en utilisant du permanganate de potassium.

On a aussi constaté quelquefois une certaine saturation du $Mn0_2$ utilisé comme "catalyseur". Il pourrait y avoir formation du sesqui-oxyde

$Mn0_2 + Mn^{2+} + H_20 \rightarrow Mn_2O_3 + 2H^+$ (1)

On peut alors régénérer le matériau filtrant par action du permanganate

$$3\ Mn_2O_3 + 2\ MnO_4^- + H_2O \rightarrow 8\ MnO_2 + 2\ OH^-\ (2)$$

Le bilan global des réactions (1) et (2) est :

$$3\ Mn^{2+} + 2\ MnO_4^- + 2\ H_2O \rightarrow 5\ MnO_2 + 4\ H^+$$

Le dépôt de $Mn0_2$ sert donc de "réacteur", mais il est nécessaire d'utiliser la même quantité d'oxydant que pour la réaction (3) citée plus loin.

Dans la pratique, au lieu de chercher à manganiser un sable, on peut utiliser un matériau filtrant constitué en grande partie de MnO_2, qui peut être mélangé en proportion plus ou moins importante avec du sable et qui doit, lui aussi, être régénéré à intervalles réguliers.

2.2.2.2. Oxydation par le dioxyde de chlore

La réaction est la suivante

$$Mn^{2+} + 2\ ClO_2 + 2\ H_2O \rightarrow MnO_2 + 2\ O_2 + 2\ Cl^- + 4\ H^+$$

Il faut 2,5 g de ClO_2 pour oxyder 1g de Mn^{2+}. L'oxydation par le dioxyde de chlore est peu utilisée car elle est relativement lente et nécessite, pour obtenir une vitesse acceptable, de dépasser largement la stoechiométrie, compte tenu des MO présentes dans l'eau qui consomment une partie du dioxyde de chlore introduit, en réduisant le $C1O_2$ en ions chlorite $C1O_2^-$, indésirables dans une eau traitée.

2.2.2.3. Oxydation par le permanganate de potassium

Il y a oxydoréduction entre le manganèse manganeux et le permanganate

$$3\ Mn^{2+} + 2\ MnO_4^- + 2H_2O \rightarrow 5\ MnO_2 + 4\ H^+\ (3)$$

La proportion théorique est de 1,9 g de $KMnO_4$ pour 1g de Mn, mais en pratique elle varie avec le pH et la composition de l'eau. En effet, une partie du permanganate participe à l'oxydation de certaines MO réductrices présentes dans l'eau. En outre, il est indispensable de bien contrôler la dose introduite: un excès de $KMnO_4$ donne à l'eau une couleur rose, virant ensuite au jaune dans le réseau de distribution.

Si le manganèse n'est pas complexé, le pH optimal se situe vers 7,2-7,3 pour un temps de contact inférieur à 5 min. Lorsque le manganèse est complexé à des MO, le temps de réaction peut monter jusqu'à 20 min. Il est possible, dans ce cas, de régler le pH au-dessus de 8,5 pour accélérer la réaction.

Sur des eaux de surface douces, colorées, contenant une quantité importante de M0, et nécessitant une clarification totale par coagulation-floculation avec décantation (eaux de régions granitiques des massifs primaires, par ex.), la chaîne de traitement à mettre en oeuvre est alors la suivante (figure 808).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

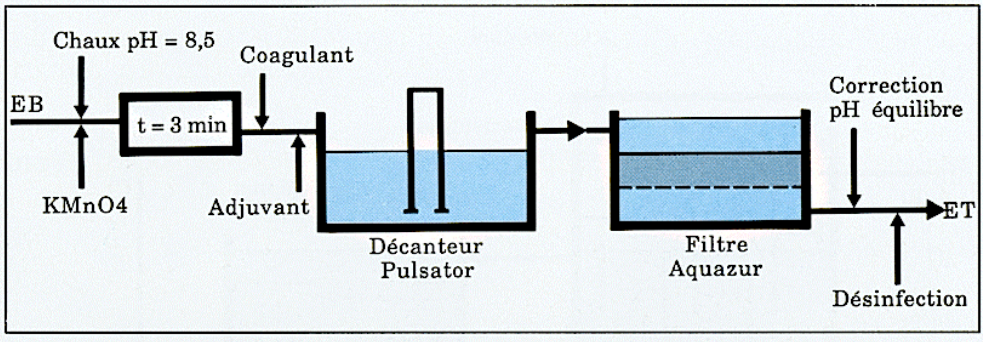


Figure 808. Schéma d'élimination du manganèse sur une eau de surface douce et colorée, contenant des MO.

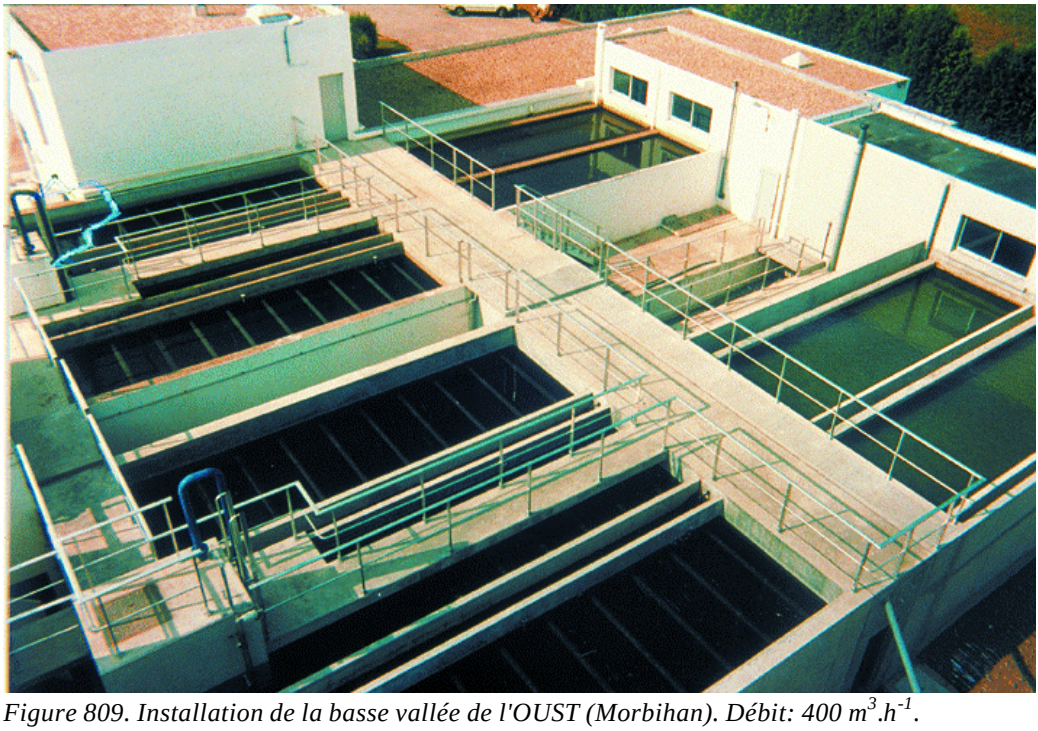


Figure 809. Installation de la basse vallée de l'OUST (Morbihan). Débit: 400 $m^3.h^{-1}$. 2 PULSATOR de 80 m^2 + 4 filtres AQUAZUR T de 21 m^2.

Il peut aussi être intéressant, sur ces eaux, d'utiliser une reminéralisation(voir page 1226).

2.2.2.4. Oxydation par l'ozone

L'oxydation de l'ion manganeux Mn^{2+} par l'ozone est rapide. La réaction est la Suivante:

$Mn^{2+} + O_3 + H_2O \rightarrow MnO_2 + O_2 + 2H^+$

Pour oxyder 1 g de Mn^{2+}, il faut 0,9 g d'ozone. La dose d'ozone introduite doit conduire seulement à l'oxydation du Mn^{2+} en MnO_2. (Si l'on introduit un excès d'ozone, on provoque l'oxydation du MnO_2 en MnO_4, d'où l'apparition d'une couleur rose dans l'eau traitée.)

L'installation de SAONE-TURDINE (France) est basée sur ce principe (figure 810).

Lorsque le manganèse est complexé à des MO et nécessite une clarification complète par coagulation-floculation décantation, l'ozone ne peut être utilisé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

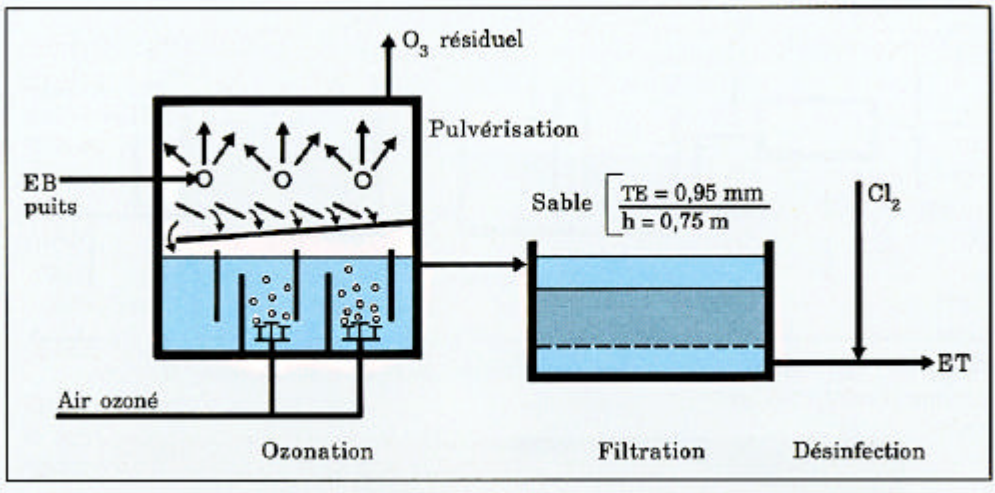


Figure 810. Schéma de l'installation de JONCHAY (Rhône) pour le syndicat de Saône-Turdine. Débit : 600 $m^3.h^{-1}$. Démanganisation.

comme préoxydant pour oxyder le manganèse. En effet l'ozone n'oxyde le manganèse qu'après avoir détruit le complexe organo-manganeux, ce qui entraîne d'une part une consommation exagérée et peu économique d'ozone, et d'autre part une stabilisation des colloïdes (d'où coagulation et floculation difficiles). L'ozone doit alors être utilisé uniquement pour favoriser la décantation (ainsi que l'élimination des MO), c'est-à-dire avec un faible temps de contact et à faible dose. Dans ce cas, le manganèse peut être éliminé de deux façons: soit par utilisation du $KMnO_4$ avant décantation, comme indiqué figure 808, soit par ozonation de l'eau décantée, le précipité de MnO_2 étant alors retenu sur les filtres.

2.2.3. Élimination biologique du manganèse. Le procédé MANGAZUR

2.2.3.1. Principe

De nombreuses bactéries (voir page 29) permettent, en milieu aérobie, une oxydation biologique du manganèse.

Pour certaines bactéries, l'oxydation du Mn^{2+} est indirecte: elle est due à l'augmentation du pH liée à la croissance de ces bactéries. Cette augmentation du pH au voisinage de la bactérie permet l'oxydation de Mn^{2+} par l'oxygène à une vitesse appréciable. Pour d'autres bactéries, elle est due à l'action d'un enzyme intracellulaire. Pour d'autres enfin, le manganèse dissous commence par s'adsorber à la surface de la membrane cellulaire. Il est ensuite oxydé par voie enzymatique. Le manganèse se concentre alors en une gaine entourant la cellule ou un groupe de cellules.

Ces bactéries exigent, pour leur développement, un milieu dont le EH doit être supérieur à 400 mV. Par ailleurs, si ce potentiel diminue fortement, certaines de ces bactéries sont capables de solubiliser (passage MnO_2 → Mn^{2+}) le manganèse qu'elles ont accumulé précédemment.

En outre, il a été montré que la présence de MO facilement assimilables favorise le métabolisme de certaines de ces bactéries.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.3.2. Avantages de la démanganisation biologique

- Réactifs: le seul réactif, en fonctionnement normal, est l'air d'aération. Il peut être cependant nécessaire d'utiliser un oxydant, généralement le permanganate de potassium, pendant la période de démarrage.
- **Aération:** le temps de contact est court sur la plupart des eaux. C'est le temps nécessaire à l'élévation du potentiel d'oxydo-réduction. L'aération peut se réaliser en ligne (sous pression) ou par cascade (gravitaire).
- **Vitesse de filtration:** la solidité du floc biologique permet, comme pour la déferrisation biologique, d'adopter des vitesses de filtration élevées, pouvant aller, dans certains cas, jusqu'à 30-40 $m.h^{-1}$, sur - des matériaux filtrants dont la taille effective est plus élevée (TE =1,35 mm) que dans le cas de la démanganisation physico-chimique.
- **Lavage:** il peut être réalisé à l'eau brute (ou à l'eau traitée non chlorée).
- Boues: les boues sont aisées à déshydrater.

2.2.3.3. Mise en oeuvre

L'installation de SORGUES (Syndicat de Rhône-Ventoux) met en oeuvre le procédé MANGAZUR (figure 811).

Le développement des bactéries impliquées dans la démanganisation biologique est beaucoup plus lent que celui des bactéries de la déferrisation. Le démarrage d'orle installation est donc beaucoup plus lent et peut atteindre 3 mois.

2.2.3.4. Élimination biologique simultanée du fer et du manganèse

On a vu que les conditions de potentiel redox favorables au développement des bactéries impliquées dans la déferrisation et la démanganisation sont très différentes. Dans le cas où du fer et du manganèse sont simultanément présents dans une eau de forage, il est souvent nécessaire de prévoir deux étages de filtration, comme sur l'installation de MOMMENHEIM dont le schéma est donné à la figure 813. La déferrisation biologique est réalisée sous pression, alors que la démanganisation biologique est gravitaire. Une injection de permanganate a été réalisée au démarrage de l'installation en attendant l'ensemencement

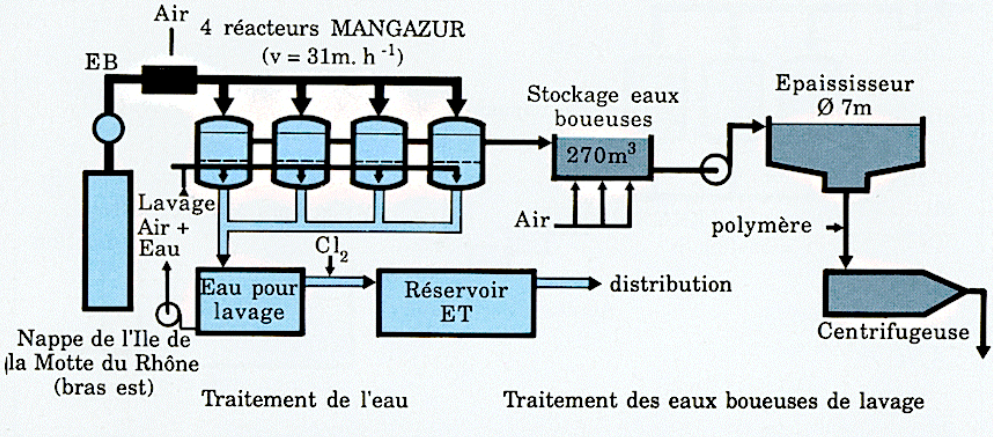


Figure 811. Schéma de l'installation de SORGUES (Vaucluse). Débit : 1 200 $m^3.h^{-1}$. Démanganisation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 812. Installation de SORGUES (Vaucluse) pour l'alimentation en eau du Syndicat Rhône-Ventoux. Débit 1200 $m^3.h^{-1}$. Démanganisation biologique. Vue des réacteurs MANGAZUR.

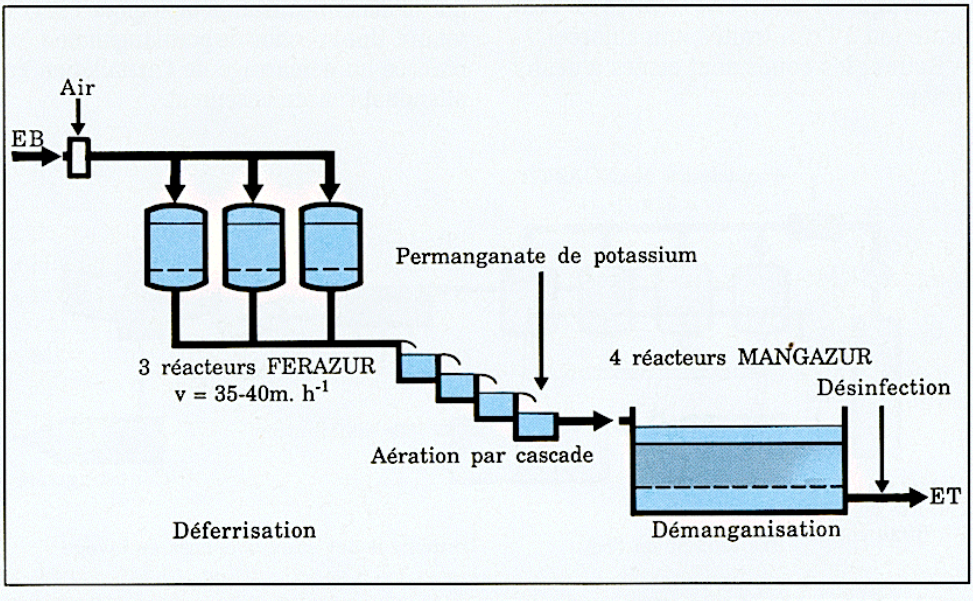


Figure 813. Schéma de l'installation de MOMMENHEIM pour le syndicat de HOCHFELDEN (Bas-Rhin). Débit 500 $m^3.h^{-1}$ extensible à 650 $m^3.h^{-1}$. Déferrisation et démanganisation biologiques.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.3. ÉLIMINATION DE L'AMMONIUM

On peut éliminer l'ammonium présent dans les eaux par procédés physico-chimiques ou par procédé biologique.

2.3.1. Procédés physico-chimiques

On a vu (voir page 253) l'action du chlore sur l'ammonium, qui est éliminé lorsque la dose de chlore utilisée est supérieure au point critique. Dans ces conditions apparaissent souvent des produits (organochlorés, haloformes...) dont la présence est indésirable dans l'eau de consommation (voir page 44). Cette technique n'est donc applicable que si la quantité de précurseurs présente dans l'eau est très faible, c'est-à-dire

- sur des eaux dont la teneur en MO est faible,
- en fin de chaîne de traitement, sur l'eau clarifiée et affinée. C'est particulièrement le cas lorsqu'il est nécessaire de pallier les insuffisances d'un traitement biologique d'élimination de l'ammonium (période d'eaux froides par exemple). L'installation de MORSANG (figure 786) est ainsi équipée d'un réservoir d'eau affinée en fin de chaîne, à flux piston.

Les **autres oxydants** (ozone, ClO_2, chloramines, $KMn0_4$) sont inefficaces pour éliminer l'ammonium.

Échange d'ions: l'emploi de la clinoptilolite (zéolithe naturelle) a parfois été suggéré pour l'élimination de NH_4, mais sa mise en oeuvre est coûteuse.

2.3.2. Élimination biologique de l'ammonium

2.3.2.1. Conditions de mise en oeuvre

Les conditions de développement des bactéries oxydant biologiquement l'ammonium en nitrite, puis en nitrate, sont précisées au chapitre 4, page 299.

Il faut notamment

- une quantité suffisante d'oxygène pour l'oxydation de NH_4 en $N0_3$,
- un apport (ou la présence) de phosphore pour assurer la croissance des bactéries,
- une concentration suffisante en hydrogénocarbonates : les bactéries sont autotrophes et en tirent le carbone nécessaire à leur développement,
- un pH bien adapté (> 7,5), - un matériau support,
- une température suffisamment élevée. En dessous de 10 °C, le métabolisme des bactéries décroît rapidement, et l'oxydation de l'ammonium est très ralentie (avec production de nitrites) voire com

plètement inhibée en dessous de 4 °C,

- absence de tout désinfectant résiduel.

Les techniques de mise en oeuvre diffèrent essentiellement par le matériau support utilisé pour la croissance des bactéries et le sens de percolation de l'eau à traiter à travers le matériau support.

2.3.2.2. Filtres à pouzzolane

Le matériau est bon marché dans la plupart des pays. La T.E. utilisée est importante (> 1 cm). Au cours du fonctionnement, il en résulte une faible augmentation de la perte de charge, mais en même temps une quasi impossibilité de laver le matériau dans le filtre lorsque (encrassement du matériau atteint une valeur incompatible avec le bon fonctionnement du nitrificateur. Le lavage doit être opéré selon deux techniques

- un lavage par macération en eau chlorée est effectué périodiquement, afin de limiter les développements bactériens et l'accumulation de boues biologiques. Cette macération est suivie par un rinçage à l'eau brute et mise à l'égout de l'eau

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

traitée pendant le temps nécessaire au redémarrage des réactions de nitritation et nitratation,

- tous les deux ou trois ans, le matériau est sorti du nitrificateur pour un lavage plus efficace, afin d'éviter la prise en masse des lits. En effet, si la nitrification biologique provoque un abaissement du pH, l'aération nécessaire à la réaction biologique provoque une élimination du CO_2, donc une augmentation du pH: l'eau traitée peut devenir entartrante et provoquer un dépôt de calcaire à la surface de la pouzzolane.

Cette technique est donc exigeante en main-d'oeuvre.

2.3.2.3. Filtres à BIOLITE

C'est la technique développée par DEGREMONT, qui utilise à cet effet le réacteur NITRAZUR N (voir page 742). L'installation de LOUVECIENNES met en oeuvre ce procédé.

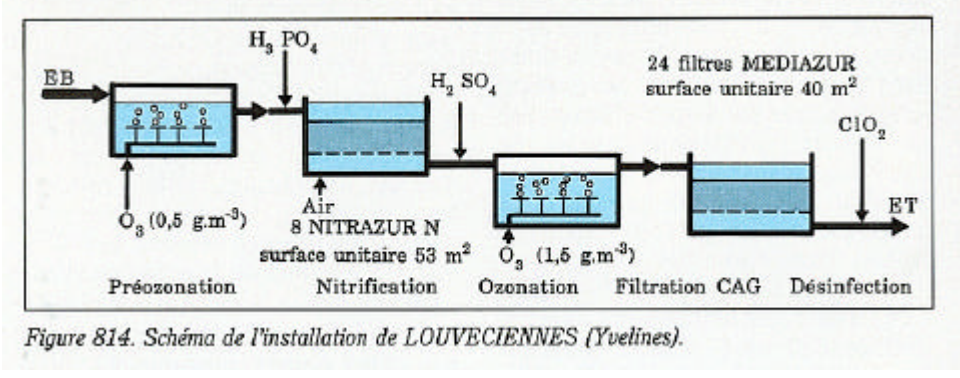


Figure 814. Schéma de l'installation de LOUVECIENNES (Yvelines).

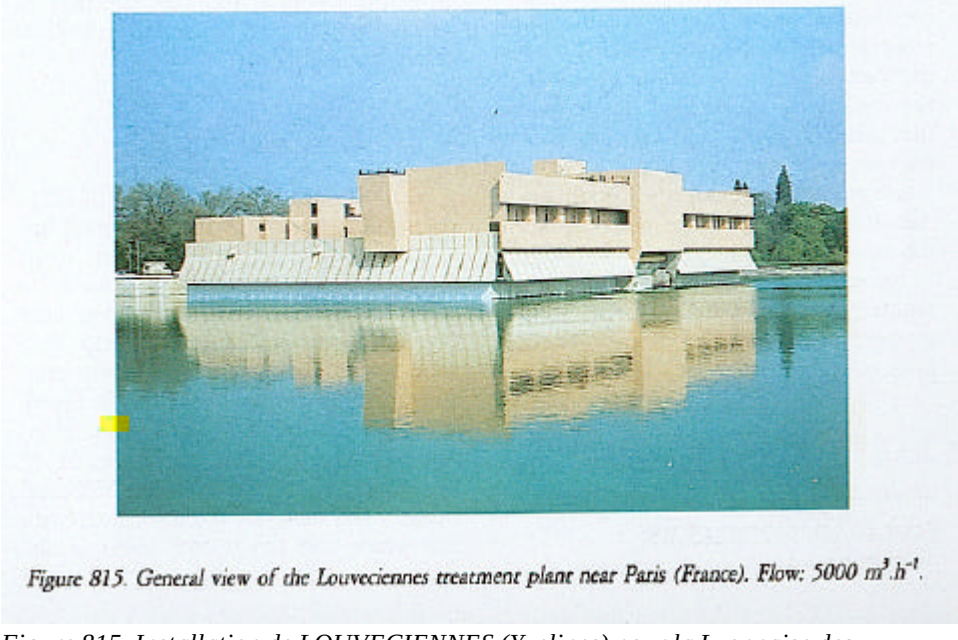


Figure 815. General view of the Louveciennes treatment plant near Paris (France). Flow: 5000 $m^3.h^{-1}$.

Figure 815. Installation de LOUVECIENNES (Yvelines) pour la Lyonnaise des Eaux. Débit: 5000 $m^3.h^{-1}$. Vue générale.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'installation traite l'eau de la nappe de CROISSY. Elle est prévue pour éliminer 5 $g.m^{-3}$ d'ammonium. Elle comporte

- un stockage d'eau brute, dont le volume de 600 000 m^3 correspond à cinq jours de fonctionnement au débit maximal,
- une **préozonation**

Le taux de traitement maximal prévu est de 0,5 $g.m^{-3}$ avec un temps de contact de 3 min. Cette préozonation provoque une aération de l'eau (augmentation de (oxygène dissous de 0 jusqu'à 8 $g.m^{-3}$) avec oxydation du fer et du manganèse.

- **Nitrification biologique**

- Huit filtres nitrificateurs (NITRAZUR N) (figures 814 et 815)

longueur : 10,5 m,

largeur : 5,0 m,

surface : 52,5 m^2,

surface totale : 420,0 m^2.

- Sens de passage: descendant, air et eau sont à contre-courant.

- Matériau filtrant: BIOLITE L, hauteur de couche 2 m.

- Air de nitrification: le rapport volumique air/eau peut varier de 0,5 à 1.

- Acide phosphorique: afin de permettre le développement des bactéries nitrifiantes, il est prévu la possibilité d'injecter de l'acide phosphorique, jusqu'à une dose de 0,2 $g.m^{-3}$ si nécessaire.

- **Acidification**

- **Ozonation**

Cette étape d'ozonation est destinée à améliorer les qualités organoleptiques de l'eau : elle permet également (inactivation des virus, l'oxydation des polluants organiques pour leur élimination biologique lors du passage sur CAG.

- **Filtration sur CAG**

- 24 filtres MÉDIAZUR

surface : 40 m^2.

surface totale : 960 m^2,

vitesse de filtration : 5,3 $m^3/h.m^2$,

hauteur de couche : 0,90 m.

- **Désinfection au dioxyde de chlore**

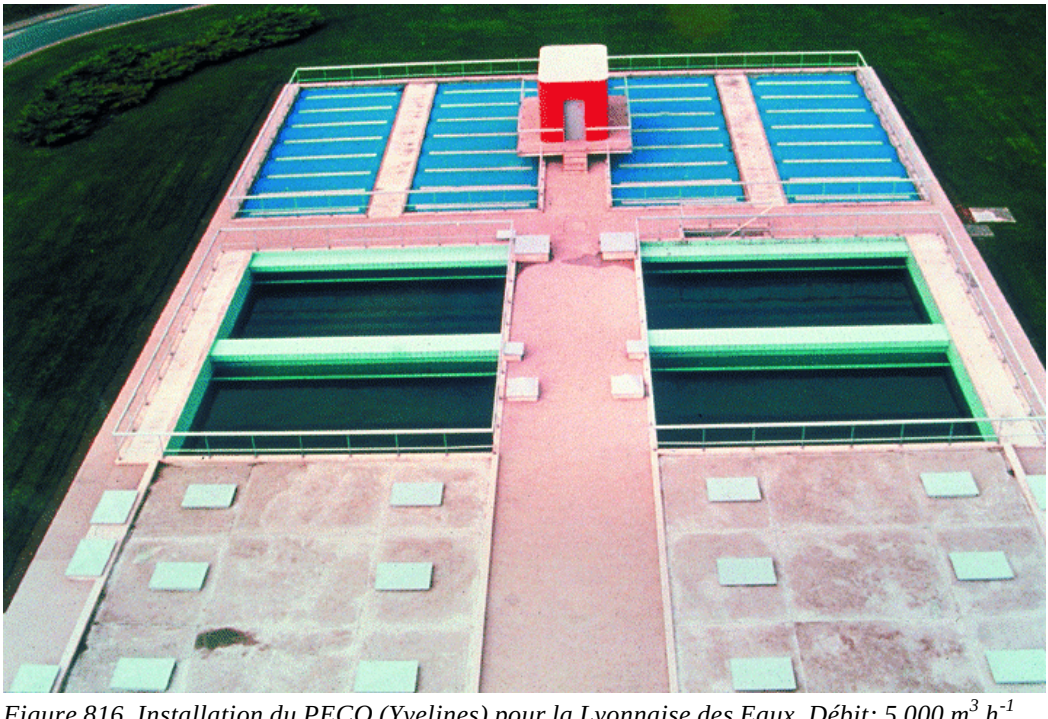


Figure 816. Installation du PECQ (Yvelines) pour la Lyonnaise des Eaux. Débit: 5 000 $m^3.h^{-1}$. Vue des filtres nitrificateurs NITRAZUR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.3.3. Traitement biologique d'une eau contenant ammonium et fer ou manganèse

C'est le cas de nombreuses eaux profondes et de certaines eaux de réserves eutrophes, contenant en outre une quantité importante de M0. Les cas de figure sont nombreux. On peut néanmoins rappeler quelques règles générales d'orientation

- à chaque étape de traitement, il importe de veiller à ce que la quantité d'oxygène dissous disponible, ainsi que le potentiel d'oxydoréduction du milieu, correspondent bien aux conditions exigées pour chacun des éléments,
- Fe et NH_4 présents simultanément dans de nombreux cas, l'ammonium ne peut être oxydé qu'après élimination du fer,
- NH_4 et Mn présents simultanément: si la quantité de NH_4 est trop importante, le potentiel d'oxydoréduction au sein de la matière filtrante peut descendre à une valeur telle que l'élimination du Mn n'est plus possible. Dans ce cas, il faut envisager un traitement en deux étapes,
- le Mn est l'élément dont l'élimination intervient en dernier, après celle du fer, puis de l'ammonium.

Remarque: dans le cas d'eau de surface dont la potabilisation requiert un traitement complet de clarification incluant un affinage, on peut constater une certaine nitrification à plusieurs des étapes mises en oeuvre, par exemple: stockage d'eau brute, lit de boue des décanteurs à lit de boue, filtres à sable, filtres à CAG

2.4. ÉLIMINATION DES NITRATES

L'élimination des nitrates peut se réaliser par voie physico-chimique ou par voie biologique.

2.4.1. Procédés physico-chimiques Le procédé AZURION

Les procédés envisageables pour éliminer les nitrates sont l'osmose inverse, l'électrodialyse et l'échange d'ions.

L'osmose inverse a déjà souvent été utilisée à d'autres fins et le procédé est développé au chapitre 15. L'échange d'ions est le seul procédé qui ait été mis en oeuvre industriellement à ce jour et c'est le seul envisagé ci-après.

L'élimination des nitrates par échange d'ions en vue de la production d'eau de consommation a été autorisée, en France, par circulaire en date du 24 juillet 1985. La définition des résines utilisables a également fait l'objet d'une autre circulaire en date du 23 juillet 1985. Avant tout projet, il importe de vérifier la législation du pays considéré.

2.4.1.1. Conditions générales d'emploi

L'emploi d'échangeurs d'ions doit être examiné en fonction de plusieurs paramètres

- teneur en MES de l'eau à traiter: elle doit être inférieure à 1 $mg.l^{-1}$. Dans le cas contraire, la rétention des MES provoque une augmentation importante de la perte de charge, des lavages fréquents et une usure prématurée de la résine,
- composition ionique de l'eau: outre les ions $N0_3^-$, l'échange d'ions retient les

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ions SO_4^{2-} et une partie des ions HCO_3^-, et les remplace par des ions Cl^- lorsque la résine est régénérée par le chlorure de sodium. Il peut en résulter, dans l'eau traitée, une concentration trop importante en ions Cl^-. Certaines résines permettent de pallier partiellement cet inconvénient en retenant préférentiellement les nitrates mais leur capacité d'échange est plus faible. Le fonctionnement en échange HCO^{-3} pourrait représenter une solution, mais il est plus délicat à mettre en oeuvre, et plus coûteux,

- évacuation des éluats : les éluats de la régénération contiennent tous les sulfates et nitrates de l'eau brute avant traitement, une partie des ions bicarbonates, et une forte proportion du chlorure de sodium utilisé comme régénérant. Il est indispensable de pouvoir disposer d'un exutoire permettant l'évacuation de ces éluats,

- influence de la température: l'échange d'ions a l'avantage de pouvoir être utilisé quelle que soit la température de l'eau à traiter.

2.4.1.2. Mise en oeuvre

L'usine du Rest à PLOUENAN, qui traite une eau de surface pour le compte du Syndicat de l'Hom, met en oeuvre le procédé AZURION pour la dénitratation. La chaîne de traitement est schématisée sur la figure 817.

Les éluats sont stockés pendant la saison sèche dans une lagune, d'où ils sont pompés pour dilution en rivière pendant la saison des pluies.

La technologie choisie à l'usine du Rest pour l'échange d'ions proprement dit est la régénération à contre-courant avec couche essorée (blocage à l'air), mais il en existe **d'autres** (voir page 805).

2.4.2. Les procédés biologiques

2.4.2.1. Conditions générales d'emploi

Ces techniques mettent en oeuvre des bactéries fixées. Des essais ont été effectués pour utiliser des **bactéries autotrophes** dont la croissance est rendue possi-

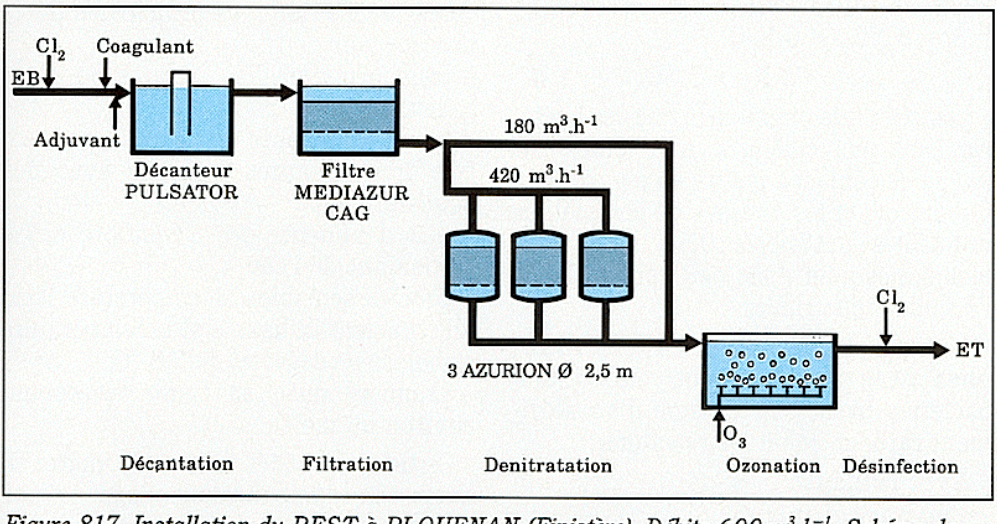


Figure 817. Installation du REST à PLOUENAN (Finistère). Débit : 600 $m^3.h^{-1}$. Schéma de la dénitrification.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

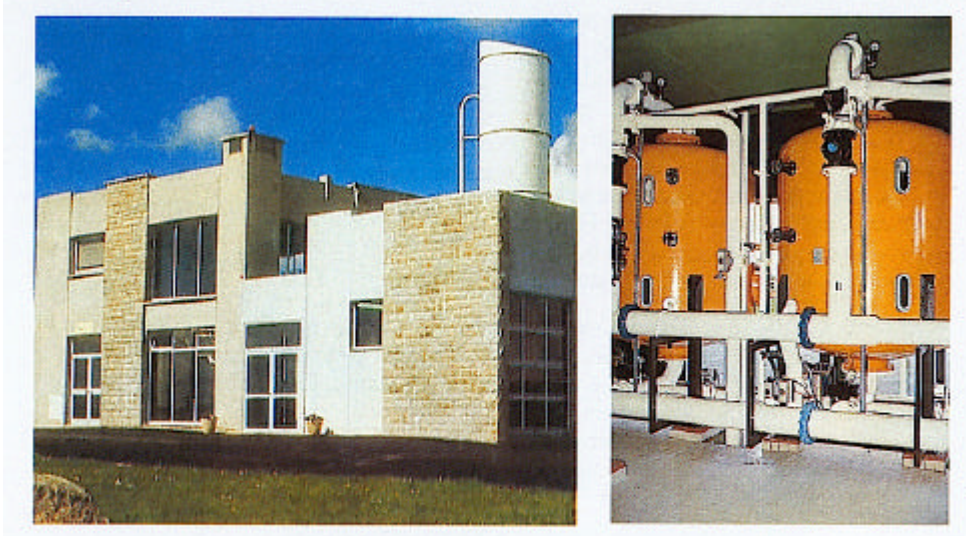


Figure 818. The Kernilis plant in western France. Flow: 500 $m^3.h^{-1}$. 3 × 2.5 m diameter Azurion exchangers.

Figure 818. Installation de KERNILIS (Finistère). Débit: 500 $m^3.h^{-1}$. 3 échangeurs AZURION diamètre 2,5 m.

ble en utilisant par exemple l'hydrogène selon la réaction

$$2\ NO_3^- + 5\ H_2 \rightarrow 4\ H_2O + N_2 + 2\ OH^-$$

ou un support soufré :

$$5\ S + 6\ NO_3^- + 6\ H_2O \rightarrow 3\ N_2 + 5\ SO_4^{2-} + 4\ H^+$$

Les résultats ont montré que ces bactéries ont une cinétique très lente: les temps de contact à mettre en oeuvre sont importants et les vitesses de percolation utilisables sont faibles: 0,5 à 1 $m.h^{-1}$. Ces techniques sont donc peu applicables à l'échelle industrielle.

L'utilisation de **bactéries hétérotrophes** est le procédé le plus courant. Ces bactéries tirent leur énergie d'un nutriment carboné selon les réactions

Avec l'éthanol

$$12\ NO_3^- + 5\ C_2H_5OH \rightarrow 6\ N_2 + 10\ CO_2 + 9\ H_2O + 12\ OH^-$$

Avec l'acide acétique

$$8\ NO_3^- + 5\ CH_3COOH \rightarrow 4\ N_2 + 10\ CO_2 + 6\ H_2O + 8\ OH^-$$

Les caractéristiques principales de ce procédé sont:

- transformation des nitrates en azote gazeux,
- boues (biomasse en excès) pouvant être traitées après mélange avec des boues urbaines,
- peu d'influence sur l'équilibre calco-carbonique de l'eau,
- procédé sensible à la température. Il est difficilement utilisable si la température s'abaisse en-dessous de 7-8 °C,
- première mise en route nécessitant environ un mois.

Certains procédés tentent de mettre en oeuvre la dénitrification dans le sol, comme cela est parfois constaté naturellement dans certaines nappes. Ces procé-

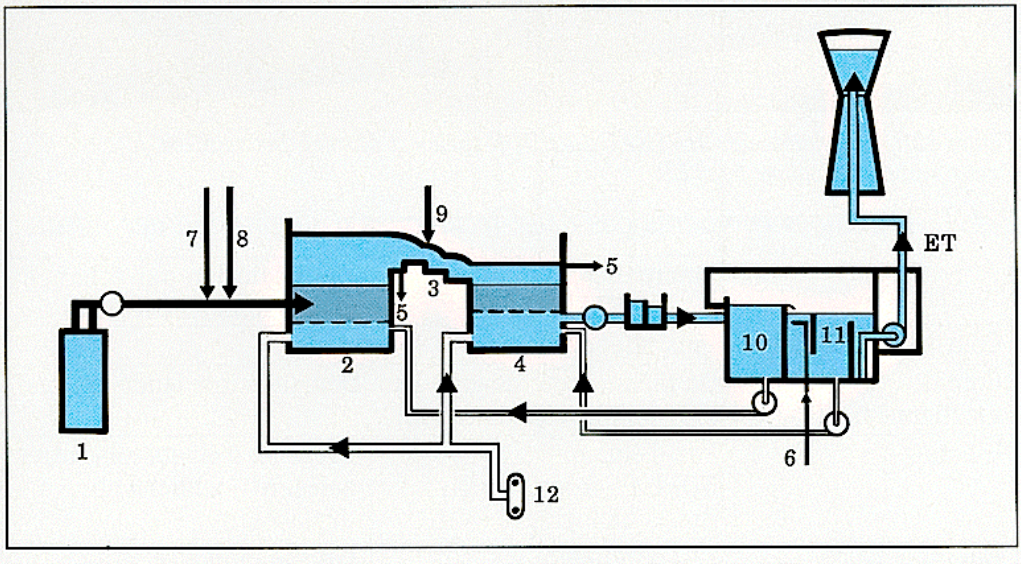
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

dés sont cependant difficilement contrôlables, et il est préférable de réaliser la dénitrification biologique "hors sol", dans une installation spécialement conçue à cet égard.

2.4.2.2. Mise en oeuvre - Le procédé NITRAZIJR D

La figure 819 schématise ce procédé.

Le réacteur NITRAZUR D (voir page 740) fonctionne à courant ascendant, en cocourant avec l'azote libéré, ce qui diminue les inconvénients dus à l'embolie gazeuse provoquée par l'azote. L'installation peut fonctionner indifféremment en utilisant comme nutriment l'acide acétique ou l'éthanol, selon les conditions économiques. Toutefois, dans le cas d'eau peu minéralisée, il est nécessaire d'utiliser l'éthanol, et non l'acide acétique (baisse importante du pH). Le charbon actif, outre son effet filtrant, a un rôle de finition qui permet l'élimination biologique du nutriment carboné résiduel. Le lavage du réacteur se fait à l'eau non chlorée. L'introduction du chlore pour la désinfection se fait dans une deuxième bâche de stockage.



1. Eau brute (NO_3^-).
2. Réacteur biologique NITRAZUR D.
3. Aération.
4. Filtre MÉDIAZUR à CAG.
5. Sorties d'eau de lavage.
6. Chlore.
7. Réactif phosphoré (PO_4).
8. Réactif carboné.
9. Coagulant ($FeCl_3$).
10. Réservoir d'eau traitée non chlorée.
11. Réservoir d'eau traitée chlorée.
12. Air de lavage.

Figure 819. Ligne de traitement du procédé NITRAZUR D.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 820. Installation de CHATEAU-LANDON (Seine-et-Marne). Débit: 50 $m^3.h^{-1}$. Dénitrification biologique pour ER

2.4.3. Avantages comparés des deux techniques d'élimination des nitrates

	Dénitrification biologique NITRAZUR	**Dénitratation par échange d'ions AZURION**
Coût d'investissement	Plus important	
Coût de fonctionnement	Du même ordre de grandeur. Demande une étude cas par cas (salinité-concentration)	
Éluats	Pas d'éluats $N0_3$ transformés en N_2 Boues biologiques	Présence d'éluats concentrés salés. $N0^-_3$ seulement déplacés
Équilibre calco-carbonique	Peu d'influence	Grosse influence Rend l'eau plus agressive
Automatisme	Plus complexe	Facilement réalisable
Salinité de l'eau brute	Peu d'influence	Impossibilité d'utilisation si trop de chlorures et de sulfates dans l'eau
MES de l'eau brute	-	Très sensible aux MES de l'eau à traiter
Température	Traitement impossible si trop basse	Peu d'influence
Exploitation .	Nécessité d'un suivi plus attentif	Fonctionnement très stable

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.5. MODIFICATION DE L'ÉQUILIBRE CALCOCARBONIQUE

Ces traitements sont destinés d'une part à mettre l'eau à l'équilibre calcocarbonique (pH = pH_S.), c'est la neutralisation, d'autre part à permettre, dans le cas des eaux peu minéralisées, la formation de la couche protectrice de carbonate calcoferreux, c'est la reminéralisation. Ils peuvent également avoir pour but de réduire la quantité d'hydrogénocarbonate (décarbonatation) ou de calcium (adoucissement) de l'eau. Le principe de ces traitements a été développé au chapitre 3, page 261).

2.5.1. Neutralisation

De nombreuses installations utilisent l'injection de chaux pour la correction du pH de floculation et du pH final. L'installation de YAOUNDÉ met en oeuvre la ligne de traitement suivante (figure 821)

- Coagulation au sulfate d'aluminium.
- Correction du pH de floculation au lait de chaux.
- Dosage d'adjuvant de floculation.
- Injection de Cu SO_4 (lutte asti-algue).
- Décantation: 3 décanteurs PULSATOR de 25 x 23,4 m.
- Filtration: 6 filtres AQUAZUR V de 77 m^2.
- Correction du pH final par adjonction d'eau de chaux.
-Désinfection par chloramine (chlore + sulfate d'ammonium).

La neutralisation du CO_2 agressif peut également se faire par **filtration sur produit neutralisant**

La mise en oeuvre de ces réactifs granulés se fait le plus souvent dans des filtres fermés sous pression. On utilise parfois des filtres du type ouvert, dans le cas où

Figure 821. Installation de YAOUNDÉ (Cameroun). Débit: 4200 m^3 h^{-1}.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

l'on dispose d'une charge hydraulique suffisante, pour éviter le pompage.

Les deux sens de filtration sont théoriquement possibles. Quand on passe de haut en bas sur le matériau neutralisant, ce dernier joue aussi le rôle de filtre mécanique: ce faisant, il se tasse et présente une tendance à l'encrassement, qui varie avec la qualité de l'eau à traiter; il faut donc procéder à des lavages à contre-courant

Lorsque la percolation se fait de bas en haut, le détassage et le lavage ne sont en principe pas nécessaires, mais il faut alors réserver ce type de traitement à une eau dépourvue de MES.

La charge volumique maximale admissible est fonction du type de matériau, de sa granulométrie, de la quantité de $C0_2$, de l'alcalinité initiale et de la température de l'eau à neutraliser. En pratique, elle varie de 2 à 10 vol./vol.h.

Le produit neutralisant se consomme. Il est nécessaire de prévoir périodiquement une recharge du filtre pour compenser cette perte (recharge effectuée en général après consommation de 20 % de la charge initiale).

2.5.2. Reminéralisation

La reminéralisation est utilisée dans le cas d'eaux naturellement très douces ou après un traitement de dessalement, par osmose inverse par exemple (elle a, de ce fait, été mise en oeuvre pendant longtemps en fin de chaîne de traitement).

La figure 822 donne la ligne de traitement de la station de LISBONNE-ASSEICEIRA (Portugal) alimentée en eau de barrage présentant un TH de 0,9 °F, un TAC de 0,7 °F et un pH de 7,1. Ces valeurs indiquent qu'il est impossible d'obtenir la couche protectrice permettant d'éviter la corrosion.

Cette installation permet de délivrer une eau traitée dont le TAC final est compris entre 5 et 8 °F.

La reminéralisation peut aussi être avantageusement utilisée avant coagulation-floculation-décantation. L'eau est ainsi plus tamponnée. Il en résulte un fonctionnement de la clarification plus régulier et plus souple. L'imprécision inévitable des systèmes de dosage a alors moins d'influence que sur une eau brute non tamponnée. Les impuretés de la

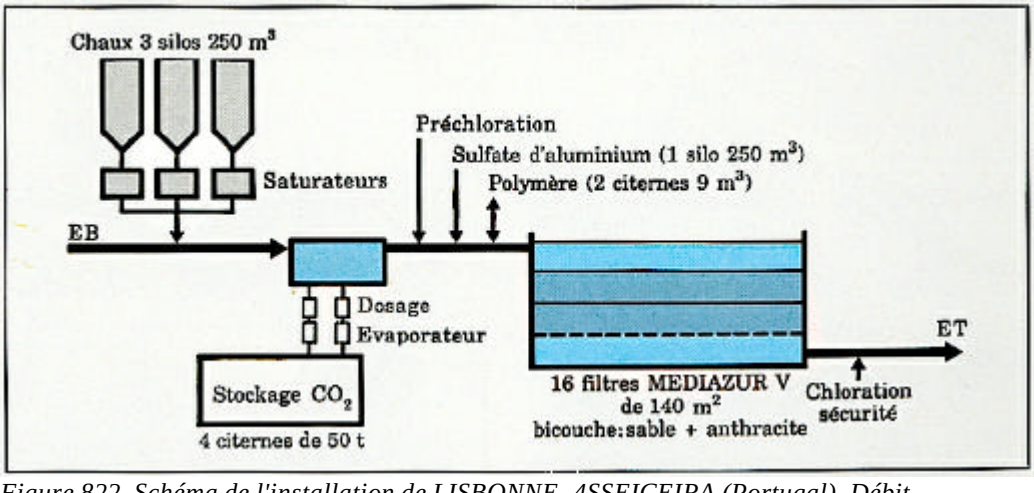


Figure 822. Schéma de l'installation de LISBONNE-.4SSEICEIRA (Portugal). Débit nominal: 375000 $m^3.j^{-1}$. Maximal: 500000 $m^3.j^{-1}$. Reminéralisation par injection de CO_2 - injection de chaux.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

chaux permettent aussi de produire un meilleur flot, de bien meilleure résistance mécanique. Il est également possible d'utiliser l'eau de chaux (surtout avant flottation). Cette technique est maintenant courante. L'installation de CONCARNEAU en est un exemple (figure 823).

Enfin, la reminéralisation peut aussi être appliquée à l'eau décantée. Dans ce cas, la coagulation - floculation - décantation est réalisée à pH acide, permettant ainsi une élimination optimale de certaines M0. Après reminéralisation, l'eau est affinée (ozone et/ou CAG) dans des conditions plus favorables à l'oxydation par l'ozone et à l'élimination du manganèse éventuellement encore présent à cette étape de traitement.

D'autres modes de reminéralisation sont possibles, en particulier par injection de CO_2, et filtration sur produit neutralisant, comme c'est le cas de l'installation d'ÉPINAL (figure 110 page 242).

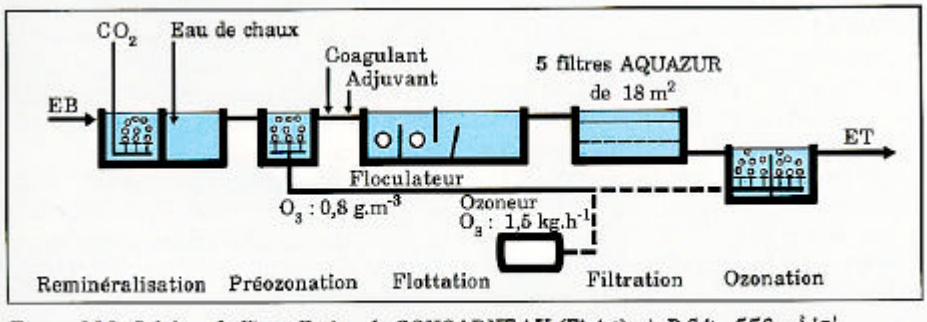


Figure 823. Schéma de l'installation de CONCARNEAU (Finistère). Débit : 550 $m^3.h^{-1}$. Reminéralisation en tête avec préozonation.

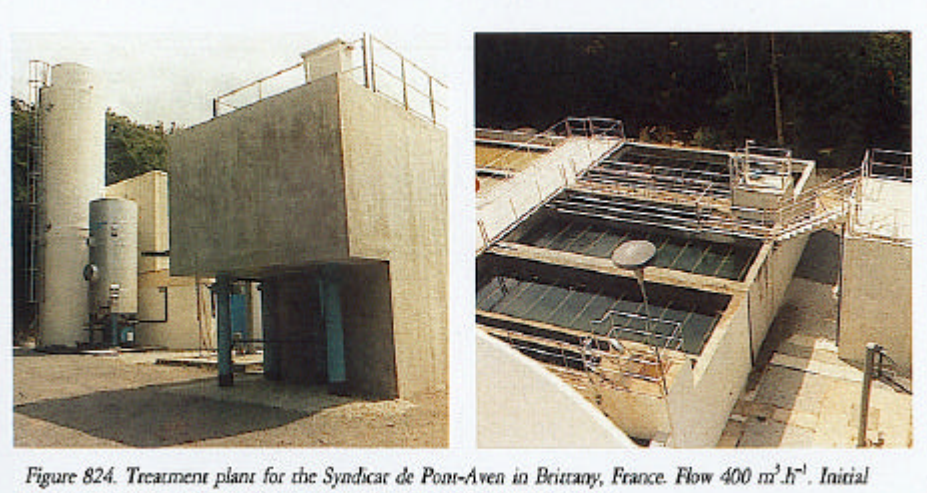


Figure 824. Treatment plant for the Syndicat de Pont-Aven in Brittany, France. Flow 400 $m^3.h^{-1}$. Initial remineralization with milk of lime and CO_2. View of preozonation plant.

Figure 824. Installation du syndicat de PONT-AVEN (Finistère). Débit: 400 $m^3.h^{-1}$. Reminéralisation en tête avec lait de chaux et CO_2 - Préozonation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.5.3. Adoucissement Décarbonatation

2.5.3.1. Adoucissement par décarbonatation à la chaux

Lorsque le TH de l'eau est élevé et qu'il s'accompagne d'un TAC important, on peut adoucir l'eau par décarbonatation à la chaux.

Cette décarbonatation peut être faite

- de façon catalytique par GYRAZUR s'il n'est pas nécessaire d'effectuer de clarification conjointe et si la teneur en magnésium est faible,
- par décantation dans les autres cas.

Le réactif de clarification à mettre en oeuvre est le chlorure ferrique. Le sulfate d'aluminium conduirait, au pH où s'effectue le traitement, à une solubilisation de l'aluminium qui risquerait de refloculer par la suite.

Pour les traitements d'EP, on est conduit

- soit à ne décarbonater totalement qu'une partie du débit et à la mélanger au reliquat qui éventuellement doit aussi être clarifié,
- soit à décarbonater partiellement l'eau en même temps qu'on la clarifie. On constate alors que ceci nécessite d'adopter des vitesses de décantation d'autant plus faibles que la décarbonatation est moins poussée. De plus le pH peut être trop élevé et il faut alors le corriger.

Dans le cas des eaux de dureté permanente élevée, on peut conjuguer une décarbonatation à la chaux et un adoucissement au carbonate de sodium qui permet, après avoir atteint le TAC. minimal, de précipiter le calcium lié aux sulfates et chlorures et de continuer ainsi l'adoucissement. Pour que l'eau soit agréable à boire, il faut lui redonner un certain TAC par mélange avec une fraction d'eau non décarbonatée.

L'installation de VILLENEUVE-LA-GARENNE met en oeuvre un GYRAZUR pour obtenir un adoucissement partiel de l'eau. Cette installation (figure 825) traite une eau souterraine profonde dont le TH est compris entre 32 et 73 °F et le TAC entre 29 et 44 °F. Cette eau contient également de l'ammonium en quantité importante.

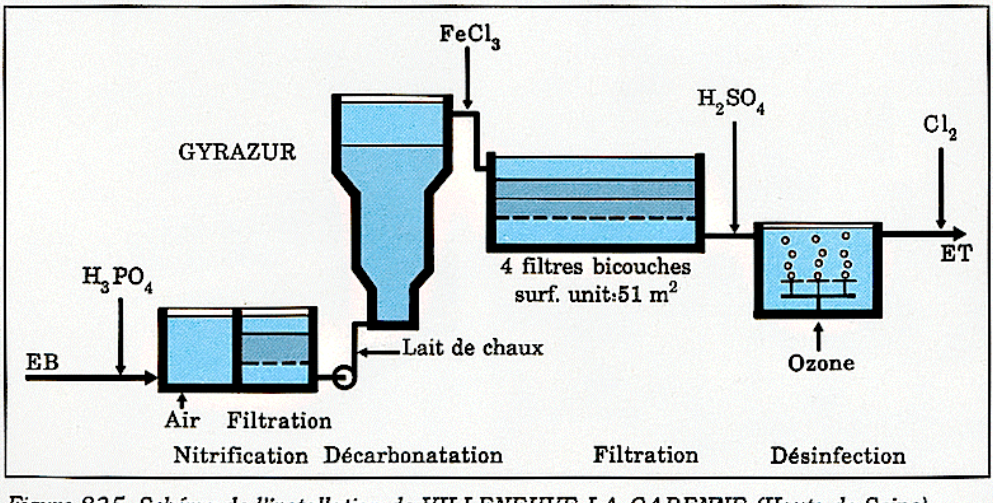


Figure 825. Schéma de l'installation de VILLENEUVE-LA-GARENNE (Hauts-de-Seine). Débit : 1800 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Après nitrification, l'eau brute est pompée vers un réacteur GYRAZUR avec injection de chaux, dont le taux est déterminé pour obtenir un TH final à 30 °F. L'eau est ensuite additionnée d'une faible dose de $FeCl_3$, qui permet de retenir sur les filtres les particules colloïdales éventuellement présentes ainsi que les MES s'échappant du réacteur. La filtration bicouche permet d'obtenir les meilleurs résultats dans cette chaîne de traitement. L'eau est ensuite ozonée. Le traitement est complété par une chloration de sécurité avant distribution.

2.5.3.2. Adoucissement sur résine

Il est indispensable de se référer à la réglementation du pays considéré pour vérifier quelles résines sont utilisables à cet effet Les résines cationiques échangent leurs ions Na^+ contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau. Le TAC ainsi que les teneurs en $SO^2{}_4{}^-$ et Cl^- ne sont pas modifiés.

L'eau ainsi obtenue a un TH nul: elle est corrosive et n'est pas agréable à boire; il est nécessaire de maintenir un certain TH résiduel (8 à 15 °F) en n'adoucissant qu'une partie du débit qui est ensuite mélangée au débit restant.

L'intérêt de ce type d'adoucissement est qu'il ne conduit pas à la production de déchets solides et qu'il peut être effectué sous pression. Les forts débits peuvent aisément être traités par échangeurs d'ions à marche continue suivant le procédé ECI-DEGREMONT.

2.6. FLUORURATION ET DÉFLUORURATION

Le terme de "fluoruration" est à préférer à celui de "fluoration", car c'est sous forme de fluorure que le fluor est ajouté (à la différence du chlore). Par analogie, on parle également de "défluoruration".

On considère généralement qu'une faible teneur en fluor de l'eau d'alimentation (0,4 à 1 $mg.l^{-1}$) est favorable à la formation de l'émail dentaire et protège les dents contre la carie. Par contre un excès de fluor entraîne la destruction de cet émail et provoque un ensemble de troubles à caractère endémique que fion groupe sous le nom de "fluoroses": malformations dentaires, taches de (émail, décalcification, minéralisation des tendons, troubles digestifs et nerveux, etc. Ces défauts apparaissent suivant les individus pour des teneurs très variables. I1 faut rejeter ou traiter les eaux dès qu'elles contiennent plus de 1 à 1,5 $mg.l^{-1}$ de F^-.

On conçoit donc qu'on puisse envisager, suivant le cas, soit un apport artificiel, soit (élimination de cet élément.

2.6.1. Fluoruration

Bénéficiant d'un avis favorable de l'OMS, elle est pratiquée surtout aux États-Unis; quelques cas isolés sont d'autre part cités en Europe, en Australie, en Amérique du Sud, etc. Mais ce traitement ne tend pas encore à être généralisé, car il n'est pas sans risque et soulève par ailleurs des oppositions. On peut utiliser les produits suivants

- hexafluorosilicate de sodium: Na_2SiF_6, le produit le plus utilisé,
- acide hexafluorosilicique : H_2SiF_6 ou fion de ses sels,
- fluorure de sodium: NaF.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le choix du produit se fait en fonction de la quantité totale à distribuer et des conditions économiques locales.

On règle le traitement (en tenant compte des fluctuations éventuelles de la teneur initiale de l'eau brute, si elle n'est pas nulle), de façon à obtenir une teneur en fluor comprise entre 0,4 et 1 $mg.l^{-1}$, suivant le climat du pays considéré.

Un tel traitement doit être accompagné de toutes les précautions utiles concernant la protection du personnel de l'installation et l'éventualité d'un surdosage accidentel.

2.6.2. Élimination du fluor

Dans certaines eaux naturelles, on trouve jusqu'à 10 $mg.l^{-1}$ de fluor. On cherche à ramener cette dose aux environs de 1 $mg.l^{-1}$(le taux admissible étant d'autant plus faible que la température moyenne annuelle est plus élevée). Les procédés employés sont les suivants

- **Utilisation du phosphate tricalcique**

On a remarqué depuis longtemps l'affinité du fluor pour ce corps, puisqu'on trouve toujours des teneurs notables en fluor dans les phosphates naturels tels que les apatites, les phosphorites (2 à 5 %), de même que dans les os. On a envisagé l'utilisation

- soit de produits naturels, tirés des os de bétail en particulier: cendre d'os (noir animal) ou poudre d'os,
- soit de l'apatite synthétique, que l'on peut fabriquer au sein de l'eau par un mélange soigneusement contrôlé de chaux et d'acide phosphorique.
-

- **Emploi de l'alumine**

On peut utiliser le sulfate d'aluminium, mais la dose doit être alors très élevée 150 à 1000 $g.m^{-3}$ selon les cas. L'eau ainsi traitée peut contenir une forte dose d'aluminium dissous; il faut en prévoir la refloculation lors de l'ajustement de pH.

La filtration sur alumine activée a déjà été pratiquée avec succès; la régénération se fait par le sulfate d'aluminium, ou par la soude et l'acide sulfurique. La capacité de rétention peut être très variable, suivant la teneur initiale en fluor de l'eau brute et les conditions opératoires: 0,3 à 4,5 g d'ion F^- par litre de produit.

- **Adoucissement de l'eau à la chaux**

Cette méthode peut être employée, à condition que l'eau présente une teneur suffisante en magnésium, car c'est la magnésie qui adsorbe le fluor. Dans le cas contraire, il faut enrichir fortement l'eau en magnésium par distribution de sulfate de magnésium ou par utilisation de chaux dolomitique. On estime qu'il faut environ 50 $mg.l^{-1}$ de magnésium pour éliminer 1 $mg.l^{-1}$ de fluor.

- **Autres procédés**

Si l'ion fluorure doit être éliminé en même temps qu'une minéralisation excessive de l'eau, l'osmose inverse peut représenter une solution spécifique de ce problème particulier. Il existe aussi des procédés électrochimiques à anode d'aluminium, dont on ne connaît toutefois pas encore d'application industrielle importante.

Dans tous les cas, il faut des essais préliminaires (si possible sur place) et une étude économique pour définir le traitement le mieux adapté.

En résumé, les techniques de défluoruration nécessitent soit une décantation, soit une filtration; c'est surtout celle-ci qui a été mise en oeuvre dans les réalisations industrielles, le matériau filtrant le plus fréquent étant l'alumine activée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.7. AUTRES PARAMÈTRES

2.7.1. Élimination des sulfates et chlorures

On emploie généralement pour les gros débits d'eau de mer ou d'eau saumâtre le dessalement par distillation flash. Pour les petits et moyens débits, le dessalement sur membranes offre une solution plus simple et fait l'objet de deux procédés principaux.

- **L'électrodialyse** (voir page 219) ne s'applique qu'aux eaux faiblement saumâtres car la capacité de débit des membranes décroît quand la salinité de l'eau à traiter augmente. Elle n'est économique que pour les eaux ayant une salinité inférieure à 3 $g.l^{-1}$ qu'elle ramène à 0,5 $g.l^{-1}$. Moins l'eau est saline, plus la consommation de courant s'élève par suite de l'accroissement de résistivité de l'eau déminéralisée. De ce fait, ce procédé n'est guère utilisable pour traiter des eaux de minéralisation inférieure à 0,5 $g.l^{-1}$.

Le procédé d'électrodialyse est adapté à des débits allant jusqu'à quelques milliers de $m^3.j^{-1}$.

- **L'osmose inverse:** la salinité de l'eau traitée est très inférieure à la salinité de l'eau obtenue par électrodialyse. La gamme des salinités acceptables sur l'eau brute est beaucoup plus étendue (voir page 835).

Pour l'élimination des sulfates, on peut également envisager l'utilisation des résines échangeuses d'ions anioniques, du même type que celles utilisées pour l'élimination des nitrates (page 1220).

2.7.2. Arsenic

I1 est tout d'abord nécessaire d'assurer l'oxydation de As(III) en As(V) (chloration par exemple) en s'assurant que tout l'arsenic est oxydé. Les ions Fe^{2+} et Mn^{2+} affectent la cinétique d'oxydation. Le carbone organique a le même inconvénient

On peut ensuite

- soit réaliser une coagulation-floculation avec sel de fer ou d'aluminium à pH 7, - soit réaliser une décarbonatation à la chaux, en assurant l'élimination de la magnésie qui précipite avec l'arsenic,
- soit réaliser une adsorption sur alumine activée, dans les mêmes conditions que pour l'élimination du fluor.

Dans tous les cas, il est souhaitable de réaliser une étude pilote pour déterminer quel est le procédé le plus économique.

2.7.3. Métaux lourds

La présence de métaux lourds est généralement constatée lorsque l'eau brute contient d'autres polluants et nécessite un traitement complet de clarification-filtration.

- **Action d'une coagulation - floculation -décantation**

La coagulation par les sels d'aluminium et de fer élimine très bien l'argent, le plomb, le cuivre; la teneur en vanadium et en mercure est abaissée de 50 % environ; la teneur en zinc et en nickel est surtout diminuée en présence de chlore. Quant au cobalt et au chrome (VI), ils ne subissent aucune réduction.

Les doses de CAP habituellement utilisées (20 $g.m^{-3}$) n'ont que peu d'influence sur l'élimination des métaux lourds.

- **Action de la filtration sur sable**

Lorsque l'étape précédente apporte une réduction correcte, la filtration sur sable conduit à des teneurs pratiquement nulles en ce qui concerne l'argent, le mercure,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

le cuivre, le plomb et le chrome (III). Par contre, le chrome (VI), le cadmium et le cobalt ne varient pratiquement pas.

- **Action de la filtration sur CAG** (2e étage) La filtration sur CAG permet une réduction suffisante des ions indésirables ou toxiques. L'argent et le mercure sont complètement éliminés, les teneurs en plomb, cuivre... sont inférieures aux niveaux guides.

- **Action de la préchloration**

Associée à la coagulation-décantation, la filtration sur sable et la filtration sur CAG, la chloration améliore l'élimination des métaux lourds, en particulier lorsque la dose de chlore utilisée est légèrement supérieure à celle correspondant au point critique.

2.7.4. Radioactivité

Les traitements spécifiques de coagulation et floculation ou de décarbonatation éliminent bien la radioactivité liée aux colloïdes (essentiellement (3), ainsi que le radium ou l'uranium 2 3 5. La filtration sur précouche de bentonite ou d'argile est également très efficace.

L'élimination par échange d'ions des composés dissous peut être envisagée résines cationiques pour les métaux et anioniques pour $^{131}\Gamma$. Pour être efficace, un traitement sur résine doit donc permettre la déminéralisation totale et être dimensionné en tenant compte de la salinité totale de l'eau.

La filtration sur charbon actif élimine certains radioéléments tels que ^{131}I, ^{51}Cr, ^{60}Co ^{181}W

2.8. ÉLIMINATION DES ALGUES ET DU PLANCTON

Il importe d'une part d'éliminer les algues éventuellement présentes dans l'eau brute et, d'autre part, d'éviter leur développement dans les différentes parties de l'installation de traitement.

- **Microtamisage**

On peut filtrer l'eau sur microtamis, surtout si elle ne contient que des algues et ne présente pas de turbidité, coloration, M0, etc., importantes.

Le vide de mailles des toiles doit être adapté aux espèces à éliminer; il est inférieur à 40 µm.

Le microtamisage est surtout efficace sur les plus grandes espèces d'algues vertes, de diatomées, de cyanophycées; le taux d'élimination global ne dépasse généralement pas 50 % et le taux de traitement en coagulant est peu affecté. Le microtamisage est en général inutile devant un traitement complet de clarification.

- **Oxydation**

Tous les oxydants désinfectants (Cl_2, ClO_2 ,O_3) détruisent le plancton à condition de présenter une teneur résiduelle suffisante pendant un certain temps (variable suivant les espèces). Mais il faut ensuite un moyen de rétention mécanique pour éliminer les organismes morts: flottation, décantation, filtration.

- **Traitement complet**

Si on veut obtenir une élimination aussi complète que possible du plancton, il faut associer une **préoxydation** (pour tuer les organismes ou annihiler leur activité dans le sable des filtres) et une **coagulation**

- soit une coagulation sur filtre à sable, si l'eau n'est pas très chargée en plancton et en MES. La fréquence des lavages dépend de la nature, de la dimension et de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

l'abondance des divers éléments du plancton. La vitesse de filtration est liée à la fréquence admissible des lavages et à l'automatisme des filtres. Quand une eau comporte du plancton, il faut être prudent dans le choix de la vitesse de filtration,

- soit une coagulation-floculation-décantation (ou flottation) suivi d'une filtration. La coagulation doit être ajustée sur l'annulation du potentiel Zêta. Dans le cas où la préchloration au point critique est possible, on obtient une élimination de 98 à 99 % dans l'eau décantée. Dans le cas contraire (risques de THM), la préozonation permet d'obtenir des résultats comparables. Dans l'eau filtrée, la teneur résiduelle est alors souvent inférieure à 10 algues par ml (au maximum 100).

- **Limitation du développement des algues dans l'installation**

Les algues se développent surtout sous l'influence de la lumière solaire dans les bassins ouverts, décanteurs, réservoirs. L'acide carbonique libre est indispensable à leur développement; la chloration, lorsqu'elle est possible, permet de le limiter.

Dans les réserves d'eau brute, on peut détruire les algues ou limiter leur prolifération à l'aide de sulfate de cuivre (2 à 3 $g.m^{-3}$), ou par la désinfection au chlorecuivre. Malheureusement, le cuivre est toxique pour les poissons et il n'existe pas de traitement qui permette de détruire les algues sans nuire aux poissons. On peut aussi limiter leur prolifération en réduisant par la chaux la teneur en (CO_2), assimilable.

Dans les canalisations d'eau brute, les mêmes traitements sont applicables, ou encore l'utilisation de chloramines.

Enfin, le développement d'algues dans les décanteurs et les filtres ouverts peut être réduit par l'addition d'une faible dose de CAP dont l'action résulte de l'obstacle qu'il oppose à la pénétration des rayons - solaires dans l'eau.

La couverture des ouvrages (décanteurs et/ou filtres) est une solution efficace.

Figure 826. Installation de MORSANG-SUR-SEINE (Essonne) pour la Lyonnaise des Eaux. Couverture de SUPERPULSATOR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. PETITES INSTALLATIONS STANDARD

Ces installations sont utilisées dans le cas où une simple clarification est suffisante.

3.1. GROUPES SEMI-FIXES GSF

Les groupes GSF DEGREMONT répondent à ces besoins: ce sont des unités de traitement travaillant sous pression et destinées à fournir de l'eau potable à partir d'une eau brute moyennement chargée ayant une turbidité maximale de 500 NTU. Pour des valeurs supérieures,

il est recommandé d'intercaler, entre la prise d'eau brute et le pompage alimentant le GSF, un prédécanteur statique consistant le plus souvent en une simple excavation et suffisant pour précipiter les matières les plus lourdes, afin de ramener la charge de l'eau à des limites admissibles pour le GSF.

Ces groupes comportent une électropompe d'eau brute refoulant à travers un décanteur du type CIRCULATOR sous pression, suivi de filtres à sable, et restituent l'eau traitée dans un réservoir situé au moins à 10 m du sol. Celui-ci permet d'assurer le lavage des filtres par retour d'eau ainsi que la distribution de l'eau traitée (figure 827).

Trois réactifs sont injectés par pompes doseuses:

- un coagulant avant décantation,
- un neutralisant ou correcteur de pH avant décantation ou après filtration,
- un désinfectant après filtration.

Les caractéristiques principales des GSF sont données parle tableau ci-dessous.

Type	Débit maximal en $m^3.h^{-1}$	Décanteur diamètre en mm	Filtres		Volume minimal du réservoir en m^3
			Nombre	Diamètre en mm	
GSF 0	1,5	1200	2	450	5
GSF 1	3	1600	2	650	9
GSF 2	6	2 300	2	800	12
GSF 3	9	2 800	3	950	18

3.2. POSTES BIDONDO

De débits supérieurs au GSF, ces postes, (figure 828) peuvent assurer l'alimentation en eau potable d'une agglomération ou d'un bourg à partir d'une eau brute moyennement chargée. Ils fonctionnent sous pression et comportent principalement un ou plusieurs décanteurs horizon taux à recirculation de boues, des filtres à

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

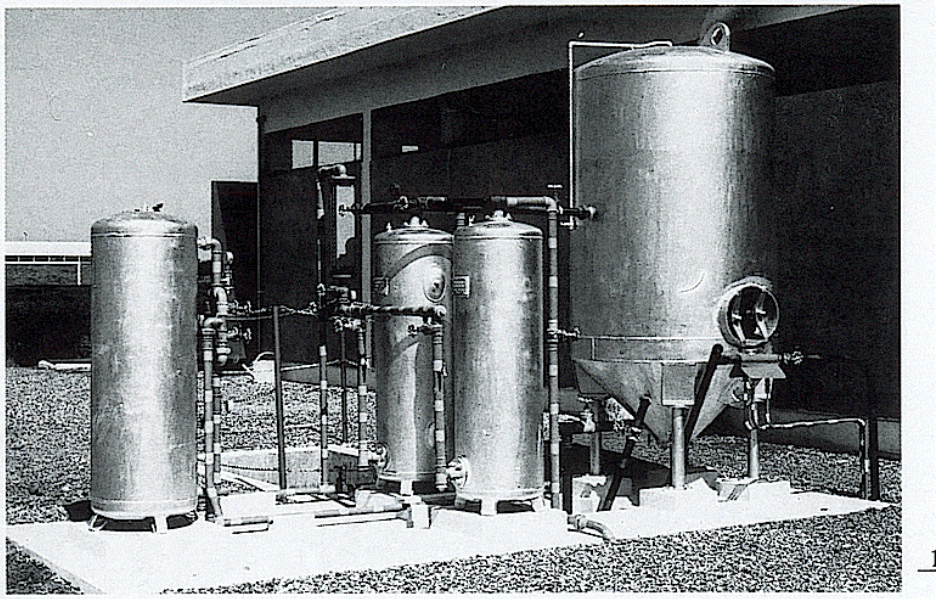


Figure 827. Ouagadougou treatment plant (Burkina Faso). Flow: 1.5 $m^3.h^{-1}$. Semi-portable GSF type O plant with GAC filter.

Figure 827. Installation de OUAGADOUGOU (Haute-Volta). Débit 1,5 $m^3.h^{-1}$. Groupe semi-fixe GSF type 0 et filtre à CAG.

sable lavés par retour d'eau, et une distribution de réactifs (coagulant, neutralisant ou correcteur de pH et désinfectant) injectés par trois pompes doseuses.

L'eau traitée est refoulée vers un réservoir surélevé (situé au moins à 10 m au-dessus du sol), servant également au lavage des filtres.

Les caractéristiques principales des Bidondo sont données par le tableau suivant

Type	Débit $M^3.h^{-1}$	Décanteurs	Filtres
VB 10	10	1-Ø 2,OmL=5m	1- Ø 1600mm
VB 15	15	1- Ø 2,5m L=5m	1- Ø 2000mm
VB 20	20	2- Ø 2,0 mL=5m	2- Ø 1600mm
VB30A	30	3- Ø 2,OmL=5m	3- Ø 1600mm
VB30B	30	2- Ø 2,5mL=5m	2- Ø 2000mm

L'ensemble des équipements électro-mécaniques ainsi que la distribution de réactifs sont regroupés dans un bâtiment.

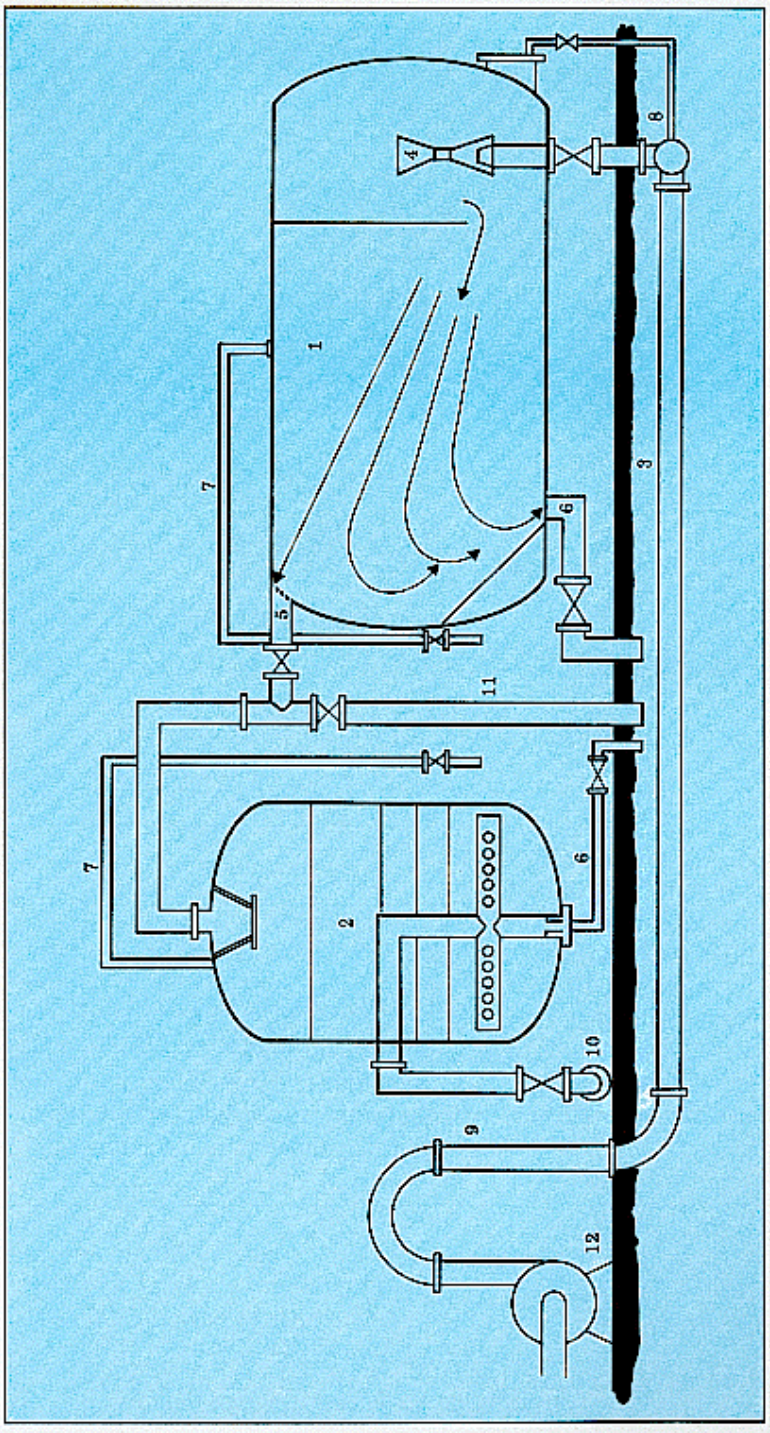
3.3. CRISTAL "M"

- **Conception**

Ces groupes **monoblocs**, ont été conçus pour le traitement des eaux de surface (rivières ou lacs) afin (obtenir une eau potable de qualité. Leurs capacités normales sont comprises entre 2,5 $l.s^{-1}$ et 15 $l.s^{-1}$ (soit entre 9 et 54 $m^3.h^{-1}$).

Leur caractéristique principale est de comporter un ou plusieurs modules de

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1. Décanteur.
2. Filtre.
3. Refoulement d'eau brute.
4. Éjecteur.
5. Sortie d'eau décantée.
Sortie d'eau de lavage.
6. Vidange.
7. Purge d'air.
8. Prise d'eau pour rincage.
9. Refoulement des réactifs
10. Collecteur d'eau filtrée.
Entrée d'eau de lavage.
11. Sortie des boues.
12. Groupe moto-pompe.

Figure 828. Poste BIDONDO.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

clarification, en tôle d'acier, préfabriqués en usine, et pouvant travailler en parallèle. Dans un module sont réunies, en une seule structure, toutes les étapes d'un traitement classique de clarification
mélange des réactifs à l'eau brute, floculation, décantation et filtration.

Cette conception facilite les opérations de transport et de mise en place des unités sur le site final d'installation.

Il existe deux modules standard de clarification

Dimensions	**Module 1 2,5 l.s $^{-1}$**	**Module 2 5 l.s $^{-1}$**
Longueur mm	2 800	5 400
Largeur mm	2 000	2 000
Hauteur mm	2 700	2 700

La mise en place de modules en parallèle peut être réalisée dès le départ, ou échelonnée dans le temps en fonction de l'accroissement de la demande en eau potable.

Chaque type de module standard comporte (figure 829)

- un mélangeur statique (1) pour diffusion rapide du coagulant injecté,
- un floculateur (2) assurant un temps de contact de plus de 20 minutes. La partie inférieure de ce floculateur est équipée de fosse à boues avec tuyauterie d'extraction, ce qui lui permet d'assurer les fonctions de dessableur et débourbeur. L'agitation est assurée par une turbine à pales verticales (3),
- un décanteur lamellaire (4) avec fosse à boues équipée d'extractions manuelles (5) et d'un volume permettant de n'intervenir que deux fois par jour sur des eaux brutes normales,
- un filtre à encrassement (6), lavé par retour d'eau et air surpressé.

- **Équipements périphériques**

Ceux-ci comportent :

- un pré-filtre à panier amovible, -un débitmètre,
- un poste de préparation et de dosage de coagulant,
- un poste de préparation et de dosage d'hypochlorite pour la préchloration et la désinfection,
- une pompe et un surpresseur d'air pour le lavage de la cellule de filtration,
- le coffret électrique de commande et de protection des moteurs électriques.

- **Stockage d'eau traitée**

L'eau traitée est recueillie dans une citerne de stockage, dont le volume doit être dimensionné en fonction des critères suivants

- permettre un temps de contact minimal pour assurer une désinfection efficace,
- réserver le volume nécessaire au lavage du ou des filtres,
- assurer la souplesse du fonctionnement du pompage de reprise en fonction de la distribution de l'eau traitée.

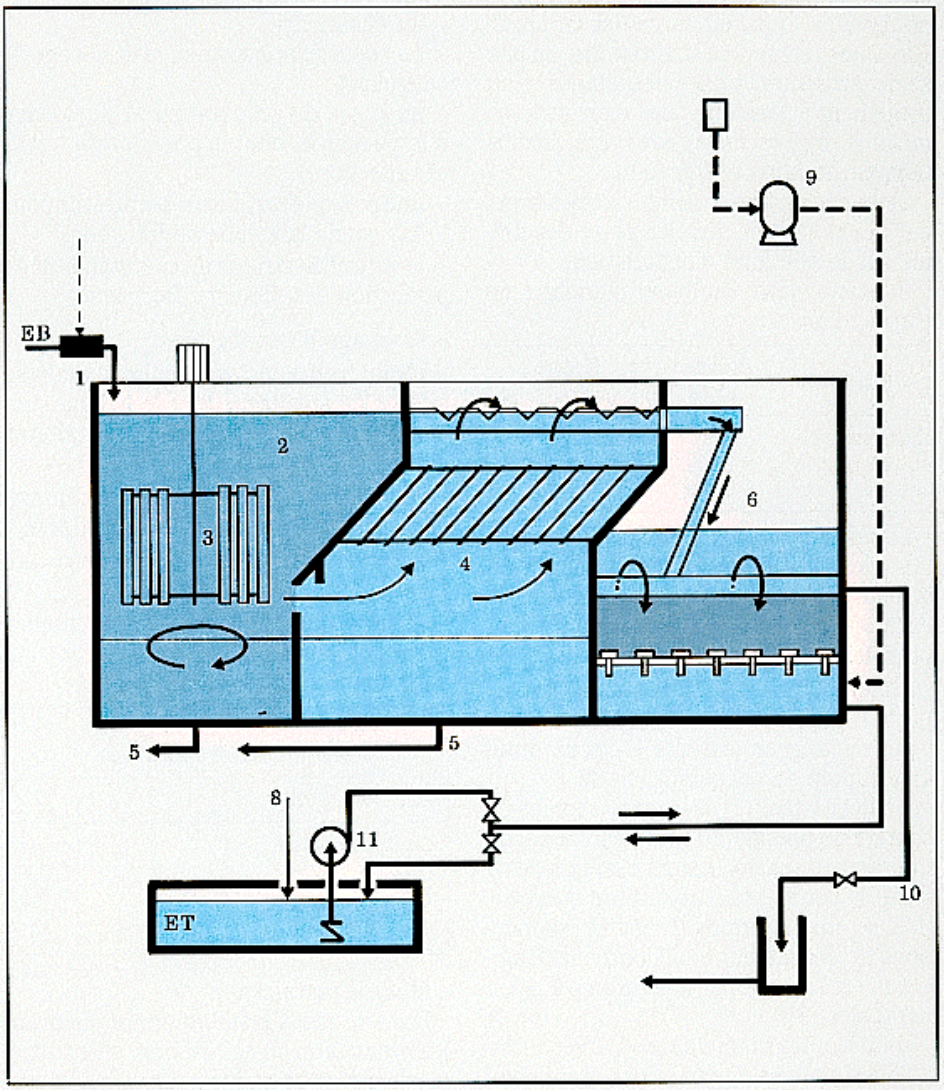
Volumes minimaux conseillés (m^3) pour le stockage d'eau traitée			
Nombre de modules	1	2	3
Capacité du module			
2,5 l.s $^{-1}$	15	25	35
5 l.s $^{-1}$	30	45	60

- **Mode d'installation**

Dans le cas d'installation en plein air, les organes de lavage du filtre et le coffret électrique sont montés sur skid.

L'ensemble des équipements périphériques peuvent aussi être livrés regroupés dans un conteneur standard de 20 pieds (6 m x 2,3 m x 2,3 m) spécialement aménagé. Ce conteneur peut abriter (en option) un groupe électrogène et une pompe de reprise d'eau traitée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1. Mélangeur statique.
2. Floculateur.
3. Turbine à pales.
4. Décanteur lamellaire.
5. Extraction de boue.
6. Filtre à encrassement.
7. Coagulant.
8. Désinfectant.
9. Surpresseur de lavage.
10. Eaux boueuses de lavage.
11. Pompe de lavage.

Figure 829. CRISTAL M – Schéma de fonctionnement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

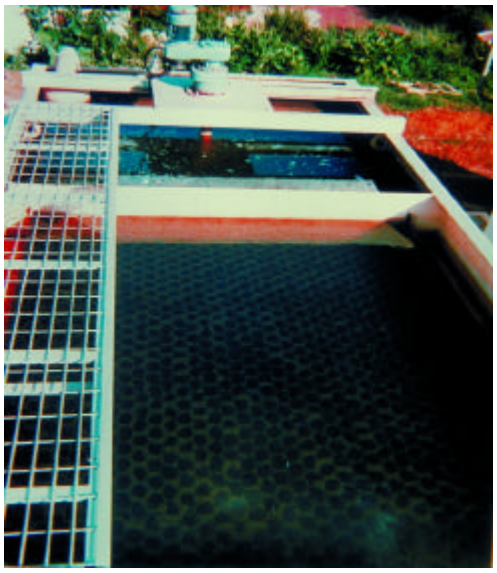


Figure 830. Installation de LASTOURVILLE (Gabon). Débit: 5 $l.s^{-1}$. CRISTAL M. Floculateur et décanteur. Détail des modules de décantation.

- **Solutions variantes**

Celles-ci correspondent à:

- une conception plus rustique
- floculateur à chicanes sans élément électromécanique,
- filtre bicouche lavable à l'eau seule par pompe,
- un schéma hydraulique différent
- filtres sous pression et refoulement vers un réservoir surélevé.

Il est possible d'utiliser le même principe pour des installations de débit plus importants. Dans ce cas, les filtres peuvent être séparés (figure 831).

Figure 831. Installation de JONGGOL (Indonésie). Débit: 5 $l.s^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

23
TRAITEMENT DES EAUX DE PISCINES

1. PRINCIPE

Les eaux de piscines sont régénérées en circuit fermé, c'est-à-dire que l'eau polluée progressivement par les baigneurs dans le bassin y est réintroduite après un traitement approprié. Un renouvellement continu de l'eau des bassins serait en effet prohibitif compte tenu du coût élevé de l'eau d'alimentation (qualité eau potable) et de son réchauffage.

Il est par contre nécessaire de procéder à un apport journalier d'eau neuve pour compenser les pertes d'eau diverses et pour réduire la concentration dans l'eau des composés organiques et ammoniacaux ou minéraux qui, sinon, augmenterait continuellement.

Le traitement de régénération des eaux de piscines considéré ici, concerne les

piscines publiques », les « piscines collectives privées» et peut s'appliquer également aux parcs aquatiques comportant des bassins de natation, rivières artificielles et divers aménagements ludiques.

L'installation de régénération des eaux de piscines doit être conçue pour assurer des conditions sanitaires parfaites, mais sa conception est liée aux réglementations qui peuvent différer suivant les pays. On pourra se référer à la réglementation française chaque fois qu'il n'existe pas de réglementation spéciale dans un pays donné.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. RÉGLEMENTATION FRANÇAISE

2.1. GÉNÉRALITÉS

En matière de traitement d'eau de piscines, la réglementation française est définie, depuis 1981, par le décret n° 81.324 du 7 avril 1981, abrogeant l'arrêté du 13 juin 1969 et fixant les règles d'hygiène et sécurité applicables aux piscines et baignades aménagées. Tout nouvel établissement doit être réalisé sur les bases de ce décret.

Une circulaire du 9 mai 1983 est relative aux piscines et à la mise en conformité des installations existantes. Ces piscines font donc l'objet d'une étude particulière, cas par cas, afin de réaliser au mieux leur mise en conformité avec le décret de 1981.

En ce qui concerne les parcs aquatiques, si leur conception générale doit répondre au décret de 1981, certaines de leurs attractions ludiques nécessitent des dispositions particulières et il est toujours prudent de se rapprocher des organismes officiels (Ministère jeunesse et Sports, DDASS) afin de soumettre le projet à leur approbation.

Ces règlements fixent en particulier les normes bactériologiques et physico-chimiques de l'eau des bassins, les dispositions générales et la circulation dans les annexes de la piscine, et un certain nombre de questions techniques concernant le traitement de l'eau. Ces aspects techniques sont considérés ci-après.

2.2. DÉBIT, RECYCLAGE ET RENOUVELLEMENT DE L'EAU

2.2.1. L'installation de recyclage et de traitement

Elle est dimensionnée pour pouvoir fournir à tout moment et à chaque bassin qu'elle alimente, un débit d'eau filtrée et désinfectée de qualité conforme aux normes fixées (page 1244).

Pour les piscines dont la surface totale de plan d'eau est supérieure à 240 m^2, cette installation assure une durée du cycle de l'eau inférieure ou égale.à:

- 8 h pour un bassin de plongeon ou une fosse de plongée subaquatique,
- 30 min pour une pataugeoire,
- 1 h 30 min pour les autres bassins ou parties de bassins de profondeur supérieure à 1,50 m,
- 4 h pour les autres bassins ou parties de bassins, de profondeur supérieure à 1,50 m.

Des débitmètres permettent de s'assurer que l'eau de chaque bassin est recyclée conformément aux dispositions précédentes.

Il peut n'être réalisé qu'une seule installation de traitement de l'eau pour plusieurs bassins, à condition que chaque bassin possède ses propres dispositifs d'alimentation, d'évacuation et de désinfection.

Les eaux coulant sur les plages ne doivent pas pouvoir pénétrer dans un bassin et sont évacuées à l'égout.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.2. L'apport d'eau neuve

Il doit se faire en amont de l'installation de traitement, par surverse dans un bac de disconnexion ou une bâche tampon, et être contrôlé par un compteur.

Un renouvellement de l'eau des bassins, à raison d'au moins 0,03 m^3 par baigneur ayant fréquenté l'installation, doit être effectué chaque jour d'ouverture.

Une vidange complète des bassins est assurée au moins deux fois par an.

2.3. CIRCULATION DE L'EAU

Pour toutes nouvelles piscines, à l'exception des pataugeoires et des bassins à vagues pendant la production des vagues, il est obligatoire de prélever au moins la moitié du débit de recyclage au niveau du plan d'eau et de réinjecter l'eau régénérée en fond de bassin.

Les écumeurs de surface ne peuvent être installés que dans les bassins dont la superficie du plan d'eau est inférieure ou égale à 200 m^2 ; il doit, dans ce cas, y avoir au moins un écumeur de surface pour 25 m^2 de plan d'eau.

Il existe deux types de circulation de l'eau dans les bassins

- le système dit de l'hydraulicité inversée consiste à introduire dans le bassin l'eau traitée par un caniveau axial ou un réseau de bouches réparties en fond, la reprise de l'eau polluée s'effectuant en totalité parla surface, à l'aide de goulottes longitudinales ou périphériques (figure 832),
- si l'on ne reprend en surface qu'une partie du débit de recyclage (au moins la moitié), c'est le système dit de **l'hydraulicité mixte** : l'évacuation de l'eau se fait en partie en surface, en partie par le fond (figure 83 3).

Grâce à ces dispositions, le maximum de pollution du bassin de natation, qui est concentré dans le film superficiel, est correctement écrémé par reprise en surface.

Le prélèvement d'une partie ou de la totalité de l'eau en surface implique des précautions importantes pour la conception et la réalisation des goulottes de reprise en surface le long des bords des bassins. Toutefois, le système à hydraulicité inversée est plus simple et généralement plus économique que celui à hydraulicité mixte.

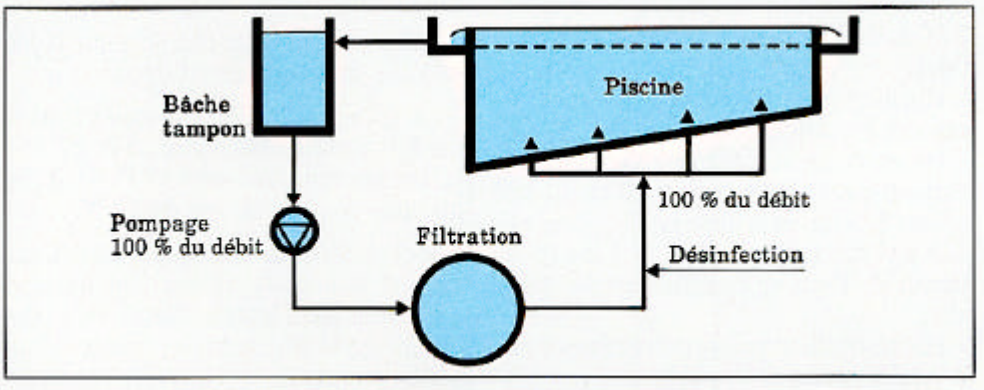


Figure 832. Hydraulicité inversée (totale).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

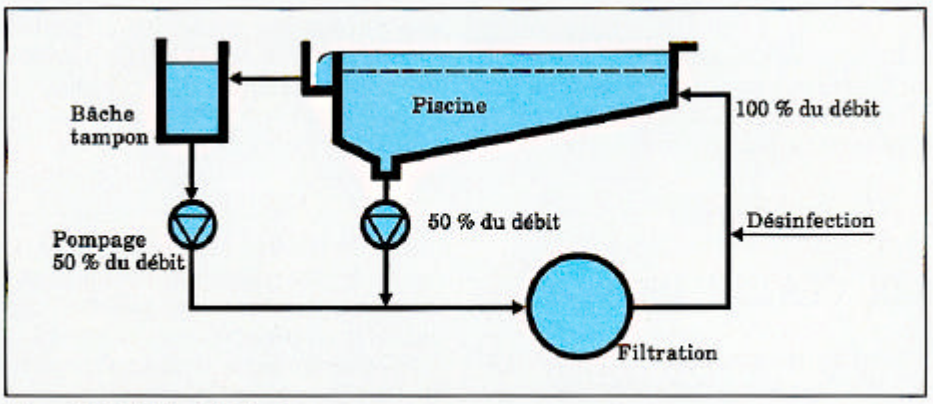


Figure 833. Hydraulicité mixte.

2.4. QUALITÉ DE L'EAU DES BASSINS

L'alimentation en eau des bassins doit être assurée à partir d'un réseau de distribution publique.

L'eau des bassins des piscines doit répondre aux normes suivantes

- sa transparence permet de voir parfaitement, au fond de chaque bassin, les lignes de nage ou un repère sombre de 0,30 m de côté, placé au point le plus profond,
- elle n'est pas irritante pour les yeux, la peau et les muqueuses,
- la teneur en substances oxydables au permanganate de potassium à chaud en milieu alcalin, exprimée en oxygène, ne doit pas dépasser de plus de 4 $mg.l^{-1}$ la teneur de l'eau de remplissage des bassins,
- elle ne contient pas de substances dont la qualité serait susceptible de nuire à la santé des baigneurs,
- le pH est compris entre 6,9 et 8,2,
- le nombre de bactéries aérobies revivifiables à 3 7 °C dans un ml est inférieur à 100,
- le nombre de coliformes totaux dans 100 ml est inférieur à 10 avec absence de coliformes fécaux dans 100 ml,
- elle ne contient pas de germes pathogènes, notamment pas de staphylocoques pathogènes dans 100 ml, pour 90 % des échantillons,
- enfin l'eau doit être non seulement désinfectée, mais également désinfectante,
- par ailleurs, l'eau des piscines couvertes doit être chauffée entre 25 et 27 °C et la température recommandée pour les piscines de. plein air est de 23 °C,
- le contrôle de la qualité de l'eau des bassins et les analyses correspondantes, effectuées par l'intermédiaire d'un laboratoire agréé, doivent faire l'objet de rapports mensuels à l'autorité sanitaire départementale.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

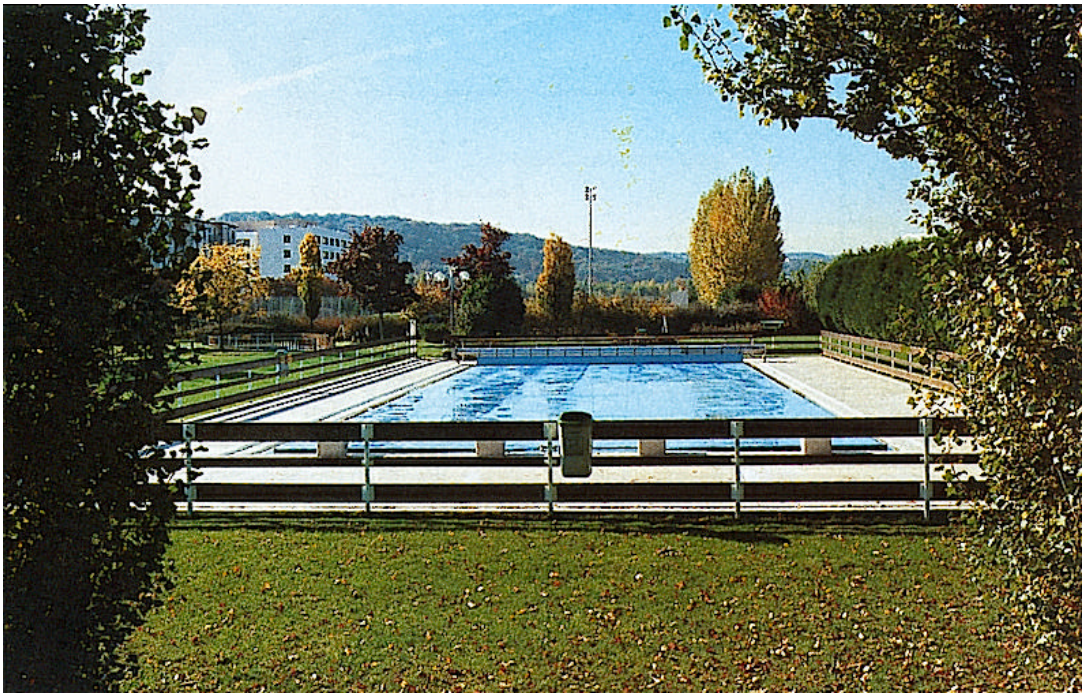


Figure 834. Vue générale du bassin extérieur de la piscine des Closeaux à RUEIL-MALMAISON (Hauts-de-Seine).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES EAUX DE PISCINES EN CIRCUIT FERMÉ

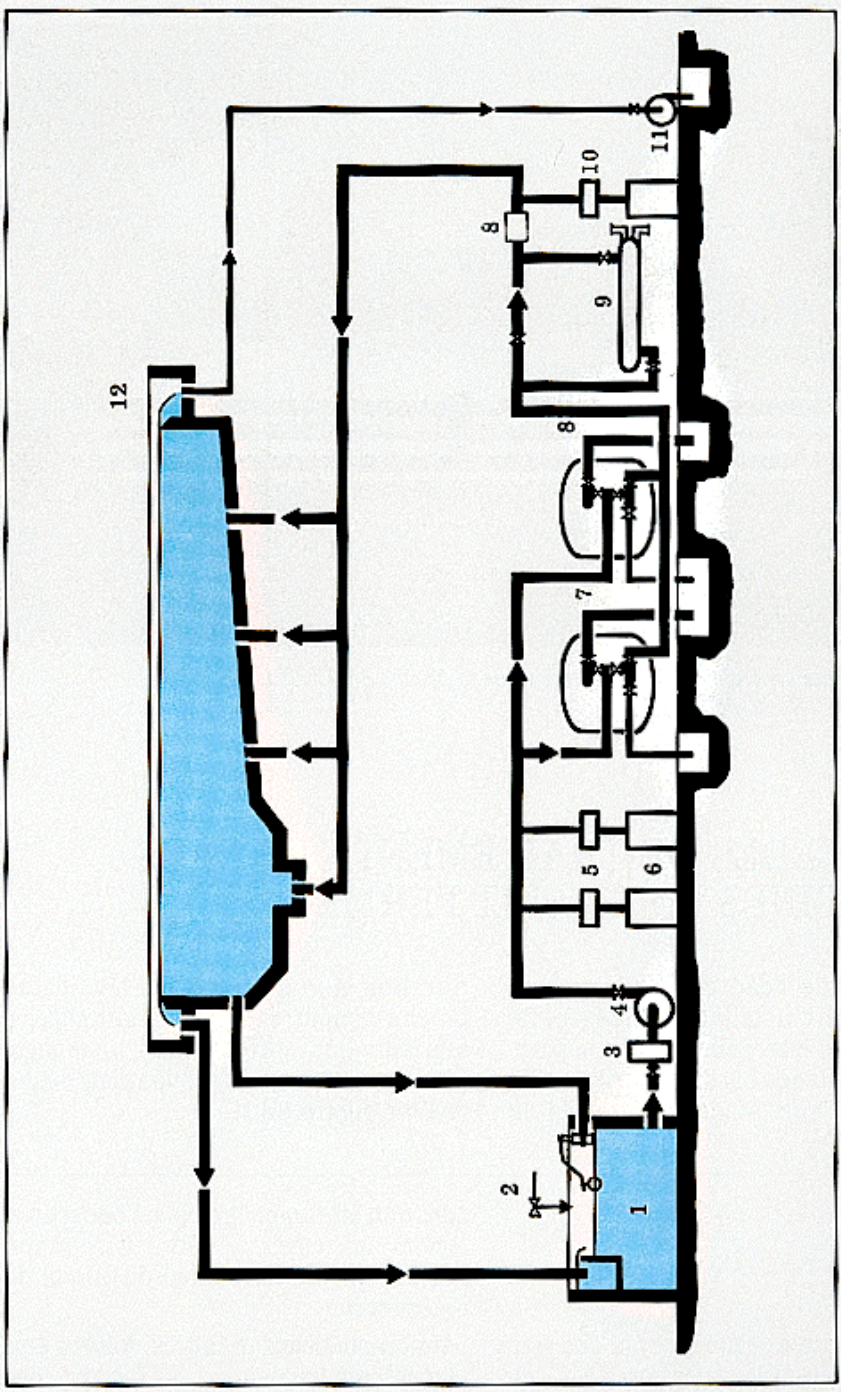
La totalité de l'eau des bassins doit transiter par l'installation de régénération avant d'être réintroduite séparément dans chaque bassin .Le traitement comprend deux stades distincts: la filtration et la désinfection. Les installations comportent les éléments successifs suivants: préfiltration, pompage,. filtration**,** réchauffage éventuel, désinfection (figure 835).

3.1. PRÉFILTRATION POMPAGE

L'eau, collectée en surface par des goulottes disposées le long des bords des bassins, doit être amenée dans un bac spécialement aménagé, qui sert à l'aspiration des pompes de circulation du circuit de régénération.

Un ou plusieurs préfiltres doivent être placés immédiatement à l'amont des

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 – Bâche de reprise.
2 – Arrivée d'eau d'appoint avec compteur.
3 – Préfiltre.
4 – Pompe de circulation.
5 – Pompes doseuses de réactifs.
6 – Bacs à réactifs.
7 – Poste de filtration.
8 – Débitmètre d'eau traitée.
9 – Échangeur de chaleur.
10 – Pompe doseuse désinfection.
11 – Pompe pour balai de piscine.
12 – Prise d'aspiration du balai.

Figure 835. Schéma général de régénération des eaux de piscine en circuit fermé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

pompes pour les protéger mécaniquement contre des déchets divers. Ce préfiltre comporte un simple panier amovible, rapidement visitable et nettoyable.

Le nombre des pompes et des préfiltres dépend de l'importance des débits de recyclage et des combinaisons possibles de ces débits pour s'adapter éventuellement aux différents cas de fréquentation des bassins. Le choix des caractéristiques et l'installation des pompes doivent être faits judicieusement en fonction des conditions de chaque piscine.

3.2. FILTRATION

On utilise le plus souvent des filtres sous pression à sable. La faible turbidité de l'eau permet de grandes vitesses de filtration et conduit à l'emploi de sable de fine granulométrie. Les filtres lavables par simple retour d'eau conviennent donc très bien à cette application (voir page 766).

Le filtre à sable type HYDRAZUR, spécialement conçu pour la filtration rapide des eaux de piscines, permet un fonctionnement jusqu'à 40 $m.h^{-1}$. Un autre type de filtre, le modèle HYDRAZUR BICOUCHE, mettant en œuvre une couche de sable et une couche de pierre ponce ou d'hydro-anthracite, permet d'atteindre jusqu'à 55 $m.h^{-1}$ de vitesse de filtration.

Le lavage s'effectue à contre-courant au débit de 30 à 40 $m^3/m^2.h$, quelle que soit la vitesse de filtration. La consommation d'eau de lavage (sur plusieurs cycles) est sensiblement la même quelle que soit la vitesse de filtration.

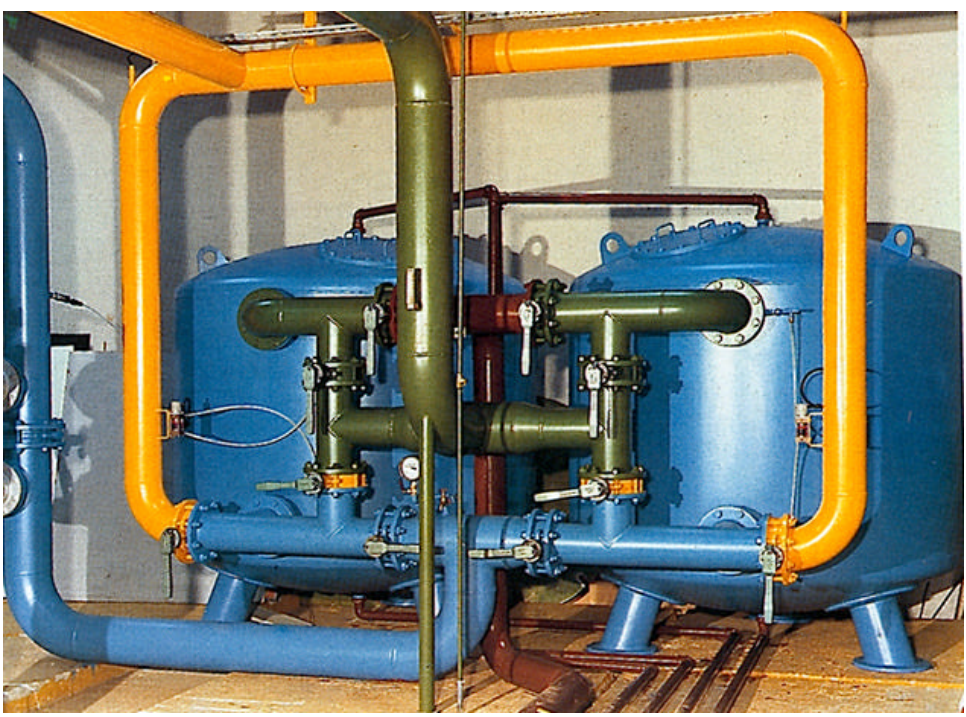


Figure 836. Piscine des Closeaux à RUEIL-MALMAISON (Hauts-de-Seine). Débit recirculé: 160 $m^3.h^{-1}$. Filtration: 2 filtres HYDRAZUR, Ø: 1,9 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

On peut parfois avoir intérêt à utiliser des filtres sous pression lavables par retour d'eau et soufflerie d'air, dont le lavage est plus rapide et ne requiert qu'un faible volume d'eau.

Il est important de noter que la filtration sur sable sans aucun apport de coagulant de l'eau ne peut pas produire une eau parfaitement claire: il suffit d'injecter préalablement à la filtration une très faible dose de sulfate d'aluminium pour coaguler les MES colloïdales qui sont ainsi retenues sur la partie supérieure du filtre, alors qu'elles traverseraient tout le lit filtrant sans être retenues si on ne prenait pas cette précaution. L'absence de coagulant entraîne une augmentation de la consommation de chlore (et d'une façon générale de désinfectant) en raison de la combinaison de ce dernier avec les matières non retenues.

Cette consommation accrue de désinfectant est néfaste par l'augmentation de concentration en chlorure qu'elle entraîne, et par la création concomitante de composés organiques chlorés, toujours indésirables.

Le coagulant est injecté par pompe doseuse, de même que le carbonate de sodium ou l'acide éventuellement requis pour ajuster le pH dans la gamme préconisée par les normes.

3.3. DÉSINFECTION

La désinfection est un stade extrêmement important du traitement. Elle a un but hygiénique et un but esthétique. Le premier consiste à éviter la transmission des maladies par contagion entre les différents baigneurs. Le second consiste à éviter les développements d'algues microscopiques qui troublent l'eau en lui communiquant une couleur verte.

Les maladies transmissibles par l'eau des baignades mal ou insuffisamment traitées sont très nombreuses mais les plus fréquentes sont

- les conjonctivites produites par un virus,
- les sinusites, angines et otites dues aux streptocoques et staphylocoques propagés par les mucosités nasales,
- certaines entérites dues aux mêmes microbes ou à certains virus, à la suite d'ingestion de l'eau,
- certaines affections de la peau (eczémas) dont le bacille de KOCH est parfois responsable.

Par ailleurs, on a attribué des cas de méningo-encéphalite, dont certains ont été mortels, à l'amibe Naegleria gruberi qui est détruite par le chlore, pourvu qu'il s'agisse de chlore réellement libre, et par l'ozone.

Enfin, certaines affections cutanées (épidermophyties dues à un champignon qui se fixe sur la peau entre les orteils, verrues plantaires dues au papillomavirus) peuvent être contractées par les baigneurs en marchant sur les plages des piscines: ces dernières doivent être nettoyées et désinfectées fréquemment

Pour éviter la contagion, il faut que l'eau du bassin possède un pouvoir désinfectant rémanent très net Les procédés de désinfection les plus courants sont au nombre de trois.

3.3.1. Chlore et dérivés

On utilise soit du chlore gazeux distribué par un chloromètre à partir d'une

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

bouteille de chlore liquéfié, soit une solution d'hypochlorite de sodium (eau de javel) distribuée par pompe doseuse ; la teneur en chlore libre de l'eau des bassins doit être comprise entre 0,4 mg.l^{-1} et 1,4 mg.l^{-1}; la teneur en chlore total ne doit pas excéder la teneur en chlore libre de plus de 0,6 mg.l^{-1}.

Le chlore est le désinfectant le plus employé et n'est pas désagréable s'il est utilisé, même à forte dose, dans une eau à pH convenable, compris entre 6,9 et 7,7. Dans cette zone de pH, il a une action bactéricide maximale et provoque un minimum d'irritation s'il est appliqué à la dose correspondant au point critique, ce qui peut correspondre quelquefois à des doses relativement très fortes (chapitre 3, § 12.3.2).

On peut également utiliser des composés de la famille des chlorocyanuriques. Ceux-ci se préparent par chloration de l'acide cyanurique. Parmi les composés obtenus on trouve l'acide trichloro-isocyanurique et le dichloro-isocyanurate de sodium. Dans l'eau, ces produits s'hydrolysent et sont en équilibre avec l'acide hypochloreux.

dichloro-isocyanurate de sodium + 2 H_2O
⇄ cyanurate de sodium + 2 HOCl

L'équilibre dépend de la concentration et du pH. L'acide hypochloreux est luimême en équilibre:

$$HOCl \rightleftarrows ClO^- + H^+$$

Les chlorocyanuriques représentent donc une réserve de désinfectant et peuvent être utilisés à ce titre pour la désinfection des eaux de piscines. Leur utilisation dépend de leur agrément par les autorités sanitaires et il importe de se référer à la législation du pays considéré.

3.3.2 Brome

Il est parfois utilisé, notamment en piscine d'eau de mer.

La teneur moyenne en brome total de l'eau des bassins doit être comprise entre 1 et 2 mg.l^{-1}. Le pH de l'eau doit être plus élevé qu'avec le chlore; il est conseillé de le maintenir entre 7,5 et 8,2.

Toutefois, l'utilisation du brome reste sujette à controverse.

3.3.3. Ozone

L'ozone est le désinfectant le plus puissant que l'on connaisse. Il est particulièrement efficace dans la lutte contre les amibes, et permet la dégradation de certains acides aminés; il donne à l'eau une belle coloration bleue. L'ozone ne provoque pas de formations de produits susceptibles d'irriter les muqueuses et il ne donne ni goût ni odeur à l'eau. L'eau réinjectée dans les bassins ne doit pas contenir d'ozone résiduel, celui-Ci doit être détruit (filtration CAG...). Une eau de piscine ne peut être traitée à l'ozone seul, par manque de pouvoir désinfectant résiduel de l'eau, qui est alors sensible aux contaminations ultérieures: il est indispensable d'apporter une désinfection complémentaire à l'aide d'une faible dose de chlore ou d'eau de javel.

La. production d'air ozoné nécessite uniquement de l'énergie électrique. La dissolution de l'ozone a lieu dans une tour de contact L'action désinfectante est assurée si un taux d'ozone résiduel de 0,4 mg.l^{-1} est maintenu pendant 4 min.

La dose nécessaire de désinfectant complémentaire est nettement inférieure à celle qui aurait été requise sans ozonation préalable, et l'effet irritant du chlore est bien moindre que s'il n'y avait pas eu ozonation.

La désinfection à l'ozone nécessite des investissements relativement coûteux, mais ses frais d'exploitation sont modérés et elle apporte beaucoup d'agrément aux baigneurs.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3.4. Autres procédés

On fait appel quelquefois à d'autres désinfectants tels que le dioxyde de chlore, l'iode, l'argent... Ces produits, dont certains sont parfaitement adaptés à d'autres utilisations de l'eau, sont aléatoires dans le domaine des piscines publiques, pour lequel ils sont rarement recommandés. Il faut, en tout cas, vérifier avant application de l'un d'eux, s'il est agréé par la législation du pays considéré. Certains pays autorisent l'emploi d'une solution d'hypochlorite de calcium à la place de l'eau de javel (hypochlorite de sodium).

On trouve dans le commerce des produits désinfectants, souvent vendus en pastilles, destinés à compléter éventuellement le pouvoir désinfectant de l'eau d'un bassin: là aussi, il y a lieu de vérifier si 1250 ces produits sont agréés.

3.3.5. Destruction des algues

Il ne doit pas y avoir de prolifération d'algues dans l'eau d'un bassin alimenté par une installation de traitement d'eau bien conçue et bien exploitée. Si, cependant, la présence d'algues est constatée, les sels de cuivre sont reliées à une tuyauterie de ceinturage du bassin, elle-même reliée peuvent être utilisés pour leur destruction, seuls ou en conjugaison avec le chlore dont ils permettent de diminuer la dose.

On prépare une solution de sulfate de cuivre à 10 % environ de produit pulvérulent commercial que l'on introduit directement, en période de non-fréquentation, le long des parois du bassin, la dose étant de 250 g de poudre (ou même 1 kg si la piscine est très verte) pour 50 m^3 de capacité du bassin. Il est nécesaire de passer le balai de piscine après quelques heures.

On peut aussi distribuer le sulfate de cuivre à raison de 1 à 2 g par m^3, dans le circuit de régénération, à l'aide d'un doseur ou d'une pompe doseuse fonctionnant en discontinu pour éviter l'accoutumance des algues.

On peut enfin agir (en dehors des heures de fréquentation des bassins) par chloration intermittente à forte dose (de l'ordre de 20 $g.m^{-3}$ avec un pH acide).

Les nouvelles membranes de micro et ultrafiltration ont la possibilité de filtrer et désinfecter l'eau, l'apport d'oxydant étant juste nécessaire pour maintenir un pouvoir désinfectant à l'eau.

3.4. NETTOYAGE DES BASSINS

Pendant la nuit, les matières en suspension se déposent dans le fond de la piscine. Il faut les enlever avant l'arrivée des baigneurs pour éviter leur remise en suspension. Cette opération s'effectue à l'aide d'un balai de piscine fonctionnant à la manière d'un aspirateur.

Le procédé consiste à installer, le long des parois de la piscine, des prises rapides sur lesquelles se branche le tuyau souple autoflottant raccordé au suceur. Ces prises à l'aspiration d'une pompe fixe équipée d'un préfiltre. Le groupe électropompe doit être distinct des groupes de recirculation, incapables d'atteindre une dépression suffisante pour la succion aisée des impuretés.

Il existe aussi des balais de piscine à pompe immergée, alimentés en courant basse tension ou très basse tension; l'eau est évacuée hors du bassin par l'intermédiaire d'un tuyau autoflottant, ou renvoyée dans le bassin après passage dans une poche ou un filtre à cartouche faisant corps avec le balai.

Il convient également de procéder au net toyage des parois des bassins par brossage à la, main ou à raide des balais décrits ci-dessus.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 837. Piscine de CALUIRE et CUIRE (Rhône). Débit recyclé : 460 $m^3.h^{-1}$. Filtration : 2 filtres HYDRAZUR bicouches, Ø : 2,5 m.

3.5. CAS PARTICULIERS

3.5.1. Correction du pH

Il est souvent nécessaire d'ajuster le pH de l'eau du circuit de régénération pour le faire correspondre aux meilleures conditions d'utilisation du désinfectant employé. Pour cette correction du pH, on utilise une pompe doseuse injectant un sel alcalin (carbonate de sodium) ou de l'acide chlorydrique dilué 20 fois.

3.5.2. Déferrisation et démanganisation

L'eau d'alimentation des piscines peut quelquefois contenir une certaine dose de fer ou de manganèse. Il est indispensable d'éliminer ces éléments qui provoqueraient des dépôts rougeâtres ou noirâtres sur les parois du bassin.

3.5.3. Piscines d'eau de mer

Certaines piscines sont alimentées en eau de mer au lieu d'être alimentées en eau douce. Le principe du traitement reste identique, mais il faut prendre des précautions d'ordre technologique pour la protection des appareils contre la corrosion. Prévoir également un renouvellement partiel de l'eau avec de l'eau douce afin d'éviter l'accroissement progressif de la concentration en sel.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.6. CONTRÔLE ET RÉGULATION

Pour maintenir son pouvoir désinfectant, l'eau d'une piscine doit conserver, quelle que soit la fréquentation à laquelle elle est soumise, un pH et un taux de chlore résiduel bien définis. En particulier, le taux de chlore résiduel minimal doit pouvoir être assuré jusqu'à la sortie du bassin.

La figure 838 schématise un système de régulation développé par DEGRÉMONT à cet effet. On prélève de l'eau au refoulement des pompes assurant la recirculation hydraulique (1), pour mesurer dans une cellule spéciale (2) le pH, le chlore résiduel et éventuellement le rH (si l'on désire faire la régulation du désinfectant en fonction du rH, ce qui est possible dans certaines conditions mais pas indispensable). Les mesures effectuées sont transmises au coffret de contrôle et régulation (3) qui actionne la pompe doseuse de chlore (4) ou le chloromètre, et la pompe doseuse du (ou des) réactifs de correction de pH (5). Ces réactifs sont introduits avant retour dans le bassin. L'injection est réalisée non seulement en fonction de l'écart avec la valeur de consigne mais également en fonction de la variation de cet écart, ce qui permet d'anticiper l'effet de la fréquentation de la piscine. Ce système peut aisément être adapté au cas de plusieurs bassins.

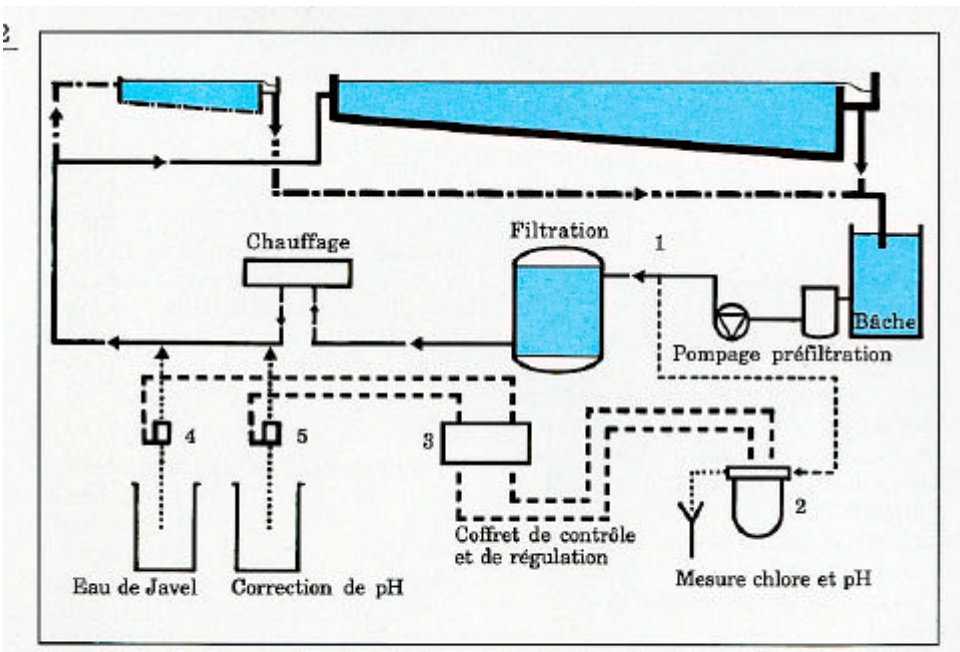


Figure 838. Régulation automatique de chlore et de pH, (1 seul point de prélèvement valable pour un seul bassin ou pour deux bassins ayant des circuits d'aspiration et de refoulement communs).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.7.
PISCINES DE LOISIRS

Le développement des parcs d'attraction conduit à la mise en œuvre de pis cines dites de loisirs. Le recyclage des eaux s'effectue selon le même principe que celui des piscines sportives, mais doit prendre en compte les facteurs suivants

- fréquentation importante,
- forme des bassins: la surface des bassins peut être très découpée, avec des profondeurs variables et le circuit de renouvellement doit éviter toute zone morte,
- température de l'eau souvent sensiblement plus élevée que dans les bassins traditionnels,
- environnement des bassins: ceux-ci sont agrémentés de plantations sur leurs rives et les personnes fréquentant les bassins peuvent consommer de la nourriture. L'eau peut donc contenir des MES diverses perturbant le fonctionnement des systèmes filtrants et créant une demande complémentaire en chlore,
- vagues, cascades, toboggans, jets d'eau ces dispositifs provoquent une évasion de CO_2 dissous, ce qui aura une incidence sur le pH de l'eau. On peut également constater une évasion du chlore,
- matériaux mis en œuvre : la reconstitution de rochers artificiels, par exemple, aggrave les problèmes de nettoyage des surfaces en contact avec l'eau.

Dans certains cas, il peut être nécessaire de mettre en œuvre des injections complémentaires de réactifs.

Figure 839. Piscine Sports et Loisirs des Lauzières à CHATEAU-ARNOUX (Alpes-de-Haute-Provence). Débit recyclé: 300 m^3 h^{-1}. Filtration: 2 filtres HYDRAZUR bicouches, Ø: 2 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

24
TRAITEMENT DES EFFLUENTS URBAINS

1. TRAITEMENT BIOLOGIQUE

Les ouvrages d'épuration biologique d'une station doivent être dimensionnés pour dégrader la pollution contenue à l'origine dans l'eau brute ainsi que celle provenant des liqueurs recyclées dans la station d'épuration, en particulier celles provenant du traitement des boues (trop pleins d'épaississeurs, filtrats, centrats, etc.).

1.1. STATIONS DE BOUES ACTIVÉES A FAIBLE CHARGE

Dans les petites et moyennes installations, le traitement est réalisé sur eaux brutes par aération prolongée avec une charge suffisamment basse pour que la stabilisation des boues puisse être assurée simultanément (charge volumique $DBO_5 < 0{,}35$ kg $m^3.j^{-1}$).

La vitesse de clarification est voisine de 0,8 $m.h^{-1}$ en pointe sur réseau séparatif.

Du fait de la suppression de la décantation primaire, il est prévu un prétraitement complet incluant, entre autres, un dégraissage. Des systèmes de traitement à faible charge de type compact sont décrits au chapitre 11, page 715.

Les bassins d'aération peuvent présenter des formes variées : carrés, rectangulaires, circulaires, etc. Leur configuration dépend en particulier du mode d'aération adopté, d'autant que dans les traitements à faible charge, les exigences du brassage conduisent le plus souvent à des dépenses énergétiques supérieures à celles nécessaires pour la seule oxygénation. C'est pour cela que l'on pratique parfois la dissociation des deux fonctions, aération et brassage, en faisant appel à deux appareillages distincts. Cette dernière disposition est facilitée par une configuration de bassin en boucle fermée (voir page 691). Par ailleurs, ces bassins, de profondeur souvent limitée, peuvent paraître favorables à l'utilisation de revêtements plastiques mais la pérennité de ceux-ci est aléatoire.

Les procédés à faible charge se prêtent bien au fonctionnement alterné des bassins d'aération (avec ou sans clarificateur).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

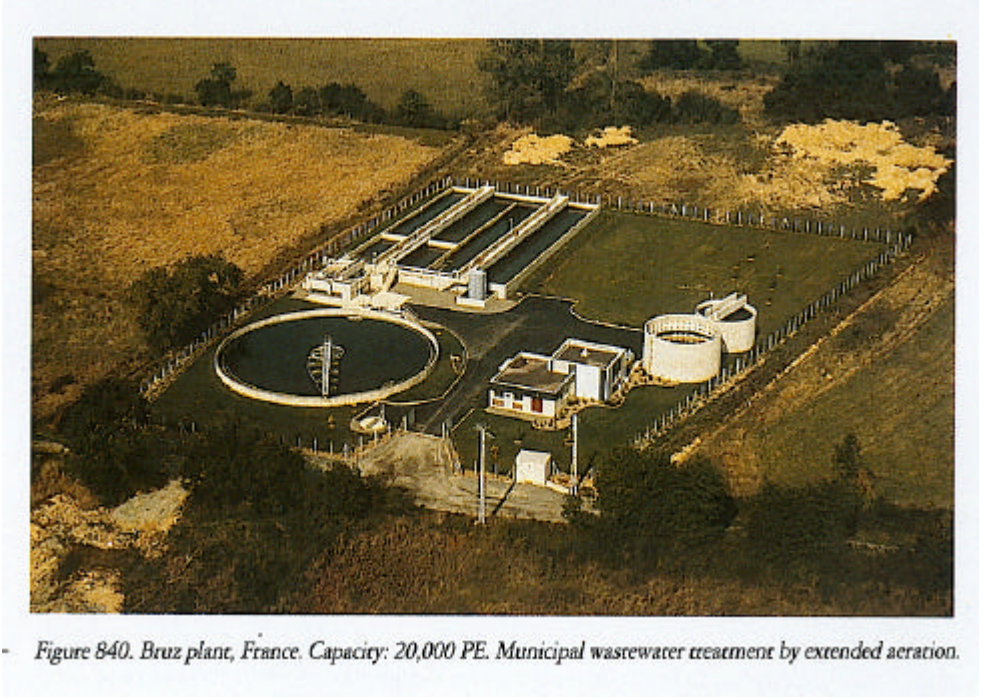


Figure 840. Installation de BRUZ (lle-et-Vilaine). Capacité: 20000 éq. hab. Traitement des ERU par aération prolongée.

1.2. STATIONS DE BOUES ACTIVÉES AVEC STABILISATION AÉROBIE

Ces ensembles de traitement réalisent, sans décantation primaire, l'épuration de l'eau brute ainsi que la stabilisation des boues en excès par voie aérobie dans des unités séparées. Tel est le cas de la station de SORGUES (voir figures 841 et 842).

Indépendamment d'un prétraitement soigné et d'un pompage éventuel, la station comprend

- un bassin d'aération (charge volumique DBO5: 1 à 1,5 kg $m^3.j^{-1}$),
- un clarificateur avec raclage de fond et de surface (vitesse en pointe, de 1 à 1,5 $m.h^{-1}$ en réseau séparatif),
- un bassin de stabilisation (2 5 à 501 par habitant) accolé le plus souvent à celui d'aération.

Le volume de stabilisation est d'autant plus grand que celui d'aération est petit. La température intervient aussi dans le dimensionnement de cet ouvrage, ainsi que la fréquence d'évacuation des boues stabilisées (voir page 940, § 2.2.1).

Les deux principales difficultés d'exploitation de ces unités sont

- concentration limitée des boues stabilisées du fait que l'épaississement et l'oxydation des micro-organismes sont généralement réalisés dans la même enceinte. L'adjonction d'un épaississeur séparé après stabilisation n'apporte qu'une faible amélioration,
- extraction des boues en excès nécessi-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tant la décantation préalable des boues en cours de stabilisation.
Dans le cas d'une extension, il peut être intéressant de faire précéder l'épuration biologique d'une décantation primaire. Cette dernière reçoit alors les boues activées en excès et ce sont les boues fraîches mixtes qui sont envoyées en stabilisation à une concentration qui doit demeurer **limitée** pour permettre le brassage. L'aé**ration** par air surpressé est , de ce point de vue, préférable

1 - Dégrillage.
2 – Dessablage - dégraissage..
3 - Bassin d'aération.
4 - Clarificateur.
5 - Recirculation des boues.
6 - Boues en excès vers le digesteur.
7 - Digesteur aérobie.
8 - Évacuation d'eau surnageante.
9 - Extraction des boues digérées.
Figure 841. Schéma de la station de SORGUES (Vaucluse).

Figure 842. Installation de SORGUES (Vaucluse). Capacité: 15000 éq. hab. Traitement des ERU avec stabilisation aérobie

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.3. STATIONS AVEC DÉCANTATION PRIMAIRE

1.3.1. Intérêt de la décantation primaire

La décantation primaire a comme objet de parfaire la qualité des prétraitements, notamment par la capture des MES naturellement décantables et par une élimination poussée des flottants. Elle est dimensionnée sur la base d'une vitesse ascensionnelle de 2,50 $m.h^{-1}$ en pointe et de 30 $m.j^{-1}$ en moyenne, elle élimine ainsi 50 à 60 des MES contenues dans les eaux brutes, ce qui abaisse de 20 à 30 % (voire nettement plus) la pollution organique exprimée en DBO_5 sans **dépense notable d'énergie.** Les volumes de bassins d'aération et les besoins énergétiques d'un traitement biologique ultérieur sont réduits dans une proportion voisine.

Les boues primaires fraîches présentent des concentrations nonnalement élevées

- 60 à 80 $g.l^{-1}$ sans retour des boues activées en excès,
- 50 à 60 $g.l^{-1}$ sur des boues mixtes comportant des boues de lits bactériens,
- 35 à 50 $g.l^{-1}$ sur des boues mixtes comportant des boues activées en excès.

La décantation primaire s'impose en amont d'une épuration par cultures fixées et dans le cas où une digestion anaérobie des boues est envisagée.

Pour réduire l'emprise au sol, la décantation primaire peut être du type lamellaire. La charge hydraulique peut alors atteindre en pointe 10 à 15 $m^3/m^2.h$, mais la concentration des boues extraites est plus faible qu'avec des décanteurs conventionnels. Les boues primaires doivent être épaissies dans un autre ouvrage, séparément des boues biologiques. La décantation lamellaire doit obligatoirement être précédée d'un prétraitement complet comportant un tamisage. Elle est particulièrement adaptée au traitement physico-chimique (voir page 1288).

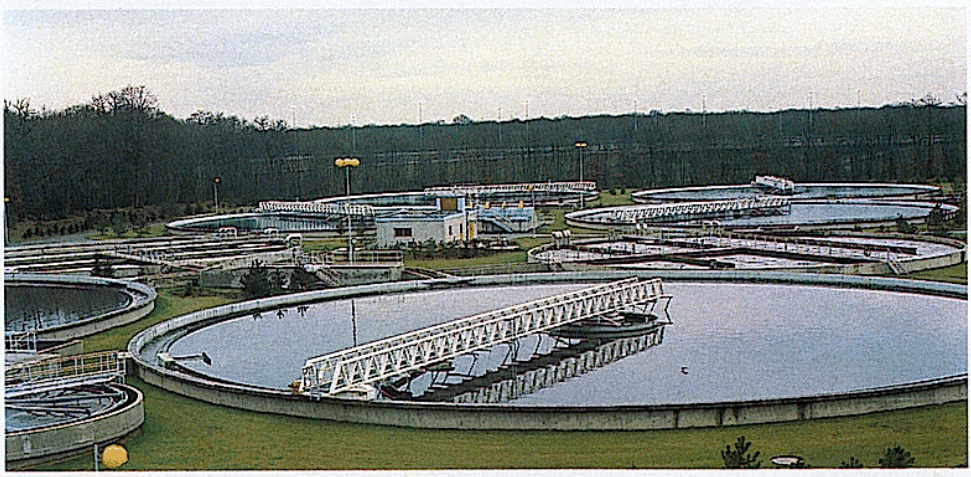


Figure 843. Mulhouse municipal wastewater treatment plant, eastern France. Capacity: 450,000 PE. View of primary settling tanks (dia.: 51 m).

Figure 843. Installation de MULHOUSE (Haut-Rhin). Capacité: 450 000 éq. hab. Traitement des ERU. Vue des décanteurs primaires Ø : 51 m.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

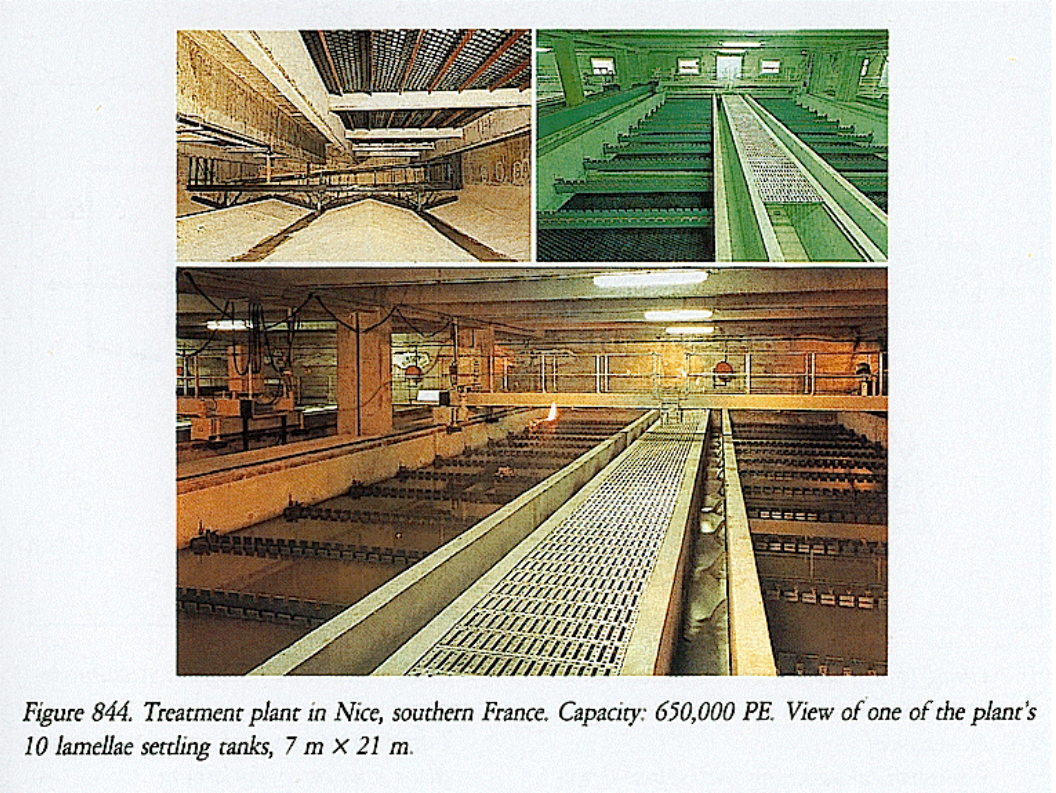


Figure 844. Treatment plant in Nice, southern France. Capacity: 650,000 PE. View of one of the plant's 10 lamellae settling tanks, 7 m × 21 m.

Figure 844. Installation de NICE (Alpes-Maritimes). Capacité: 650000 habitants. Vue d'un des 12 décanteurs primaires lamellaires 7 m X 21 m.

La compacité de la décantation lamellaire permet en outre une couverture aisée des ouvrages lorsque l'environnement l'exige.

1.3.2. A boues activées

Le schéma classique de ces stations d'épuration, qui convient aux moyennes et grandes installations, est donné par la figure 845.

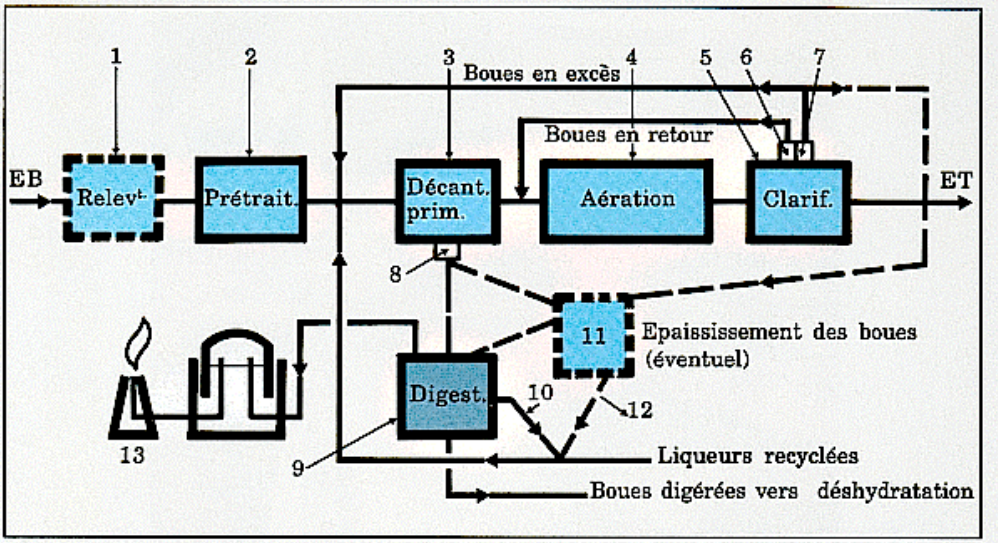
Dans le cas de simple élimination de la pollution carbonée, les bassins d'aération sont dimensionnés sur la base d'une charge volumique en DBO_5 de 1,2 à 1,8 $kg/m^3.j^{-1}$ les clarificateurs étant calculés avec des vitesses ascensionnelles en pointe inférieures à 2 m.h-1 et des vitesses moyennes journalières de 20 m.j-1. Le temps de séjour en aération n'est jamais inférieur à 1 h.

Ce type de station présente les avantages suivants (par rapport aux stations à BA sans décantation primaire)

- plus faible consommation d'énergie (possibilité d'autonomie énergétique dans le cas de traitement de boues peu énergivore)
- production de boues réduite (et à concentration plus élevée),
- meilleure stabilisation de la boue.

Si l'on veut réduire les variations de charge et de demande en oxygène de la flore bactérienne, la configuration du bassin d'aération est du type à alimentation étagée ou en mélange intégral. Si le rendement d'épuration doit être très élevé, les solutions à flux piston ou à bassins en cascades sont généralement préférées; elles sont particulièrement bien adaptées à l'élimination de la pollution azotée ou phosphorée (voir pages 1264 et 1271). Avec ces configurations de bassin la puissance d'aération va en décroissant de l'amont vers l'aval du bassin où les critères de brassage minimal deviennent prépondérants.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Relèvement (éventuel) par vis d'Archimède ou pompes.

2 - Prétraitement
- *dégrillage mécanique éventuellement avec essorage des détritus,*
- *dessablage aéré,*
- *dégraissage combiné.*

3 - Décanteur primaire, circulaire ou rectangulaire, raclé.

4 - Bassin d'aération à insufflation d'air ou aération de surface, réalisé en plusieurs canaux (différents schémas hydrauliques possibles).

5 - Clarificateur circulaire ou rectangulaire, raclé, généralement à succion.

6 - Pompage des boues en retour par pompes ou vis d'Archimède.

7 - Pompage des boues en excès, soit en tête de station, soit vers l'épaississement.

8 - Pompage des boues fraîches, soit vers la digestion, soit vers l'épaississement.

9 - Digestion anaérobie à un ou deux étages, brassage au gaz avec gazomètre séparé.

10 - Trop-plein de digestion.

11 - Épaississement des boues

12 - Surversés d'épaississeur.

13 - Torchère.

Figure 845. Schéma classique d'une station à boues activées avec décantation primaire et digestion anaérobie.

Si la station comporte plusieurs lignes d'épuration biologique, il y a toujours intérêt à disposer de moyens de recirculation des boues propres à chacune de ces lignes. Afin d'obtenir le taux d'épaississement maximal des boues fraîches avant digestion, il est souhaitable de prévoir un épaississement séparé des boues primaires et des boues biologiques en excès.

Cette disposition est de plus en plus adoptée dans les grandes installations.

Si un traitement sur boues fraîches est retenu (suppression de la digestion anaérobie) la quantité de boues est plus importante et l'effet tampon de la digestion n'existe plus: la fiabilité de l'épuration biologique est alors directement dépendante de celle de la chaîne de déshydrata

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 846. Installation de CLUSES (Haute-Savoie). Capacité: 33 000 éq. hab. Traitement des ERU par boues activées, avec décantation primaire et digestion aérobie.

Downloaded from https://hydrauliespot.blogspot.com/

Figure 847. Installation de BOLOGNE (Italie). Capacité: 450000 éq. hab. Traitement des ERU par boues activées avec décantation primaire et incinération des boues.

tion et d'évacuation des boues. Celle-ci inclut généralement, pour les grandes stations, une incinération. Tel est le cas de l'installation de BOLOGNE (voir figure 847).

1.3.3. A cultures fixées

1.3.3.1. Lits à ruissellement

. Remplissage en matériaux traditionnels

Cette technique est encore utilisée pour l'oxydation de la pollution carbonée et parfois aussi de l'ammonium dans les pays en voie de développement aux conditions climatiques favorables. Les schémas hydrauliques possibles sont donnés à la page 307. Les vitesses adoptées en décantation secondaire dépassent rarement 1,8 $m.h^{-1}$ en pointe.

La disposition de deux lits en série alternée (figure 848) permet d'améliorer les rendements.

Des taux d'abattement globaux de DBO5 de l'ordre de 95 % sur des ERU sont alors possibles en régions tempérées avec des charges DBO_5 de 0,5 $kg/m^3.j^{-1}$ sur les deux lits.

. Remplissage en matériaux plastiques

Ceux-ci, utilisés surtout pour le pré traitement d'effluents concentrés, peuvent toutefois être mis en œuvre pour l'élimination de la pollution carbonée des seuls effluents domestiques (voir figures 849 et 850). Dans le cas de lits fonctionnant en série, il n'y a pas de décanteur intermédiaire.

La recirculation est effectuée à la sortie même du lit. Deux stades de lits en série sont normalement nécessaires pour la production d'un effluent présentant une DBO5 de 30 $mg.l^{-1}$, mais les rendements d'épuration restent très influencés par les conditions de température.

La plupart des installations d'épuration d'effluents urbains avec lits à ruissellement sont prévues avec une digestion de boues par voie anaérobie.

1.3.3.2. Lits granulaires

Un réacteur biologique, du type BIOFOR par exemple (voir page 733), est disposé à l'aval du décanteur primaire.

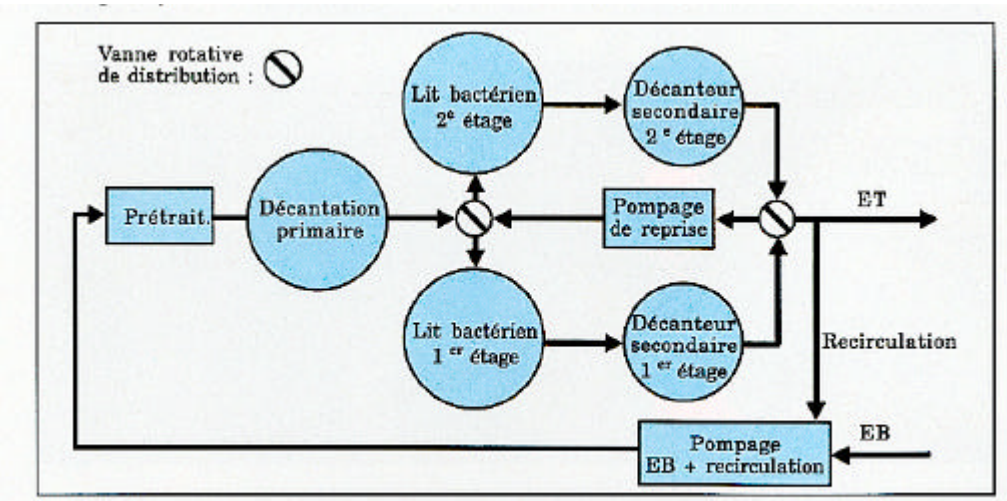


Figure 848. Schéma d'une station à lits bactériens, avec 2 étages en série alternée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Cette ligne de traitement est mise en œuvre préférentiellement sur des eaux bru- tes présentant une DBO_5 de l'ordre de 15 0 $mg.l^{-1}$, mais la solution la plus fréquemment adoptée est celle associant la floculation à la décantation primaire (voir page 1288), qui permet de traiter des eaux plus concentrées. Cette technique permet de réaliser des ensembles très compacts avec notamment une très bonne élimination des MES.

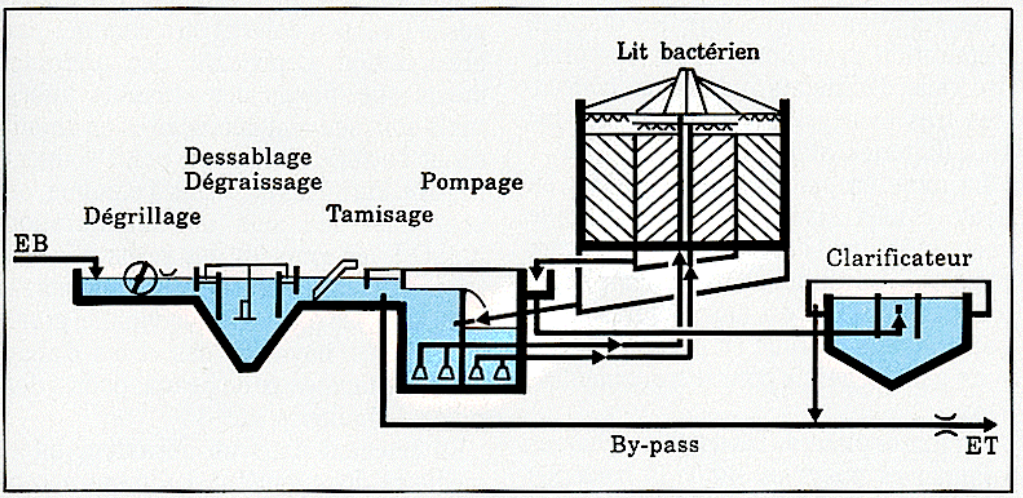
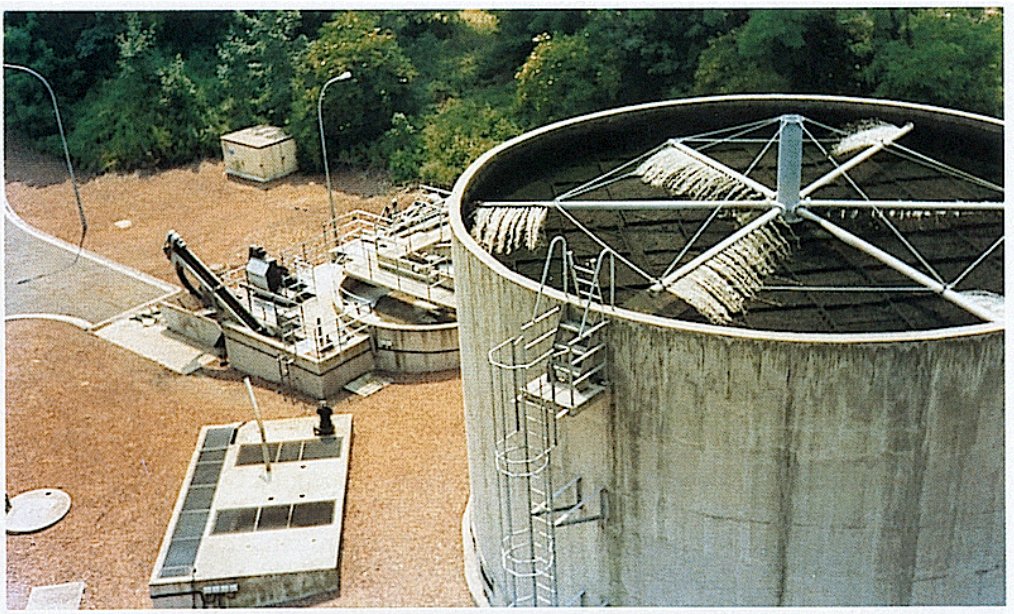


Figure 849. Schéma de la station de WINGLES (Pas-de-Calais) : 2 lits bactériens en série, concentriques à remplissage plastique.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 850. Wingles treatment plant, northern France. Capacity: 15,000 PE. Municipal wastewater treatment in trickling filters.

Figure 850. Installation de WINGLES (Pas-de-Calais). Capacité: 15000 éq. hab. Traitement des ERU par lits bactériens.

1.4. ASSOCIATION LITS BACTÉRIENS-BOUES ACTIVÉES

La pollution dirigée vers les stations d'épuration municipales peut comprendre celle d'effluents industriels concentrés très biodégradables, tel le cas des IAA (laiteries, abattoirs, etc.).

La mise en place d'une épuration en deux stades, avec un premier stade constitué d'un lit bactérien sur matériaux plastiques en amont d'un deuxième stade à boues activées, est alors intéressante. Cette solution permet en particulier

- un gain d'énergie pour le traitement de l'eau,
- un gain de place, du fait des fortes charges volumiques possibles sur le lit bactérien (rendement de l'ordre de 50 % avec des charges appliquées en DBO_5 de 5 $kg/m^3.j^{-1}$ une meilleure aptitude aux variations brutales de charge.

Le lit bactérien est alimenté par le mélange des effluents domestiques et industriels ou, mieux, parles seuls effluents industriels qui sont ensuite mélangés en amont du traitement par BA.

Compte tenu des faibles risques de colmatage par les MES fines, une décantation primaire préalable n'est, en principe, pas justifiée, sauf dans le cas où des composés toxiques doivent être éliminés par précipitation. Cependant, des prétraitements spécifiques des effluents industriels sont souvent nécessaires en amont du lit bactérien: c'est un point souvent négligé. Parmi les éléments à éliminer, on peut citer les sels en sursaturation ($CaSO_4$), les graisses des rejets d'industries laitières, les drèches des effluents de brasserie, les particules de viande, graisses, pailles, boyaux... des rejets d'abattoirs, les lambeaux de peaux, poils... des rejets de tannerie, etc.

En retenant dans un décanteur intermédiaire, fonctionnant à vitesse ascensionnelle élevée, les "lachures" de film biologique du lit bactérien à remplissage plastique, la demande en oxygène du stade boues activées est fortement réduite. La vitesse ascensionnelle adoptée sur ce décanteur peut atteindre 2,5 $m.h^{-1}$ en pointe.

1.5. NITRIFICATION-DÉNITRIFICATION BIOLOGIQUE

La nitrification biologique préalable d'un effluent permet de réduire considérablement la demande en oxygène en rivière; associée à une dénitrification biologique, elle permet l'élimination de l'azote. De ce fait, les procédés biologiques sont ceux les plus généralement mis en œuvre pour l'élimination de la pollution azotée.

1.5.1 Nitrification

Avec la cinétique habituelle d'oxydation de l'azote, les deux conditions essentielles à respecter sont

. **âge de boue minimal** (celui-ci dépend fortement de la température). A 12 °C, cet âge minimal correspond à des charges massiques voisines de 0,15 kg DBO_5/kg MES.j. Toutefois, afin de maintenir un certain taux de nitrification en période d'hiver, si les organismes nitrificateurs ont déjà pu se développer normalement en période plus clémente, les charges

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

massiques adoptées sont souvent inférieures. Les stations à aération prolongée permettent généralement une nitrification,

. apports en oxygène adaptés. Il est nécessaire de fournir au moins 4,3 kg d'oxygène par kg de nitrate éliminé.

L'alcalinité des effluents doit être suffisante pour éviter une chute de pH ralentissant la cinétique. Une partie de l'azote est synthétisée pour la formation de la biomasse: 3 à 5 % de la masse de DBO_5 entrante.

1.5.2. Dénitrification

C'est le stade complémentaire qui transforme l'azote nitrique en azote gazeux. Il est impossible d'éviter une dénitrification partielle dans un milieu nitrifiant (du fait des zones anoxies qui se créent, même à l'échelle microscopique). Le plus souvent, la dénitrification est recherchée pour éliminer l'azote et récupérer l'oxygène contenu dans les nitrates. Elle permet aussi une remontée de l'alcalinité.

Les conditions nécessaires à la dénitrification sont:

- avoir obtenu au préalable une bonne nitrification,
- disposer d'une source de carbone organique assimilable,
- être dans des conditions anoxies.

La source extérieure de carbone est généralement l'effluent brut lui-même, mais celui-ci peut être plus ou moins riche en carbone assimilable, et le taux de dénitrification atteint peut alors être insuffisant.

Pour l'épuration de certains effluents industriels riches en éléments azotés et pauvres en éléments carbonés, un apport extérieur de carbone est nécessaire. Tel est aussi le cas des installations d'épuration à BA à deux stades, dans lesquelles le deuxième stade de traitement de l'azote suit un premier stade d'élimination de la pollution carbonée.

La dénitrification peut résulter aussi du métabolisme endogène de la biomasse qui se produit lorsque la BA est mise en situation de sous-alimentation: un certain nombre de cellules sont alors lysées et les nutriments ainsi solubilisés sont utilisés comme aliments. Dans un simple bassin d'aération prolongée, le fonctionnement discontinu des aérateurs peut permettre une dénitrification partielle de ce type, mais le rendement total d'élimination de l'azote par nitrification - dénitrification ne dépasse normalement pas 70 %.

C'est aussi à la respiration endogène des boues qu'est due une certaine dénitrification non contrôlée dans des clarificateurs où la formation de bulles d'azote entraîne des remontées de boue, il s'agit là d'un phénomène parasite qu'il convient d'éviter.

Pour obtenir des rendements d'élimination élevés, et sur les stations d'une certaine importance, le schéma classique incorpore une zone anoxie, en tête du bassin d'aération (figure 851), alimentée en eau brute, qui est brassée mais non aérée.

La zone anoxie reçoit les boues recyclées en provenance du clarificateur à fort débit. Pour obtenir une concentration en nitrates dans l'effluent traité la plus faible possible, il peut être nécessaire de rajouter un recyclage complémentaire de liqueur mixte depuis l'aval du bassin d'aération. Le taux de recyclage et la possibilité de jouer sur la quantité de pollution carbonée envoyée dans la zone anoxie (en modulant éventuellement la répartition du débit d'eau brute entre zone anoxie et bassin de nitrification)

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

constituent les éléments de contrôle du système; en outre, la zone anoxie, en dehors de son rôle de dénitrification peut permettre de récupérer jusqu'à 50-60

de l'oxygène nécessaire à la nitrification. Ce procédé, applicable au traitement des rejets urbains ou industriels, est celui assurant les taux d'élimination de l'azote les plus élevés (jusqu'à 95 % dans des conditions optimales).

1.5.3. Exemples de réalisation

. **Exemple 1: la station d'épuration de VALENTON** (figure 852) qui aura à terme une capacité de 600 000 $m^3.j^{-1}$.

L'objectif principal est d'obtenir un effluent nitrifié en ne recherchant une dénitrification qu'en dehors des périodes *froi*des. Les réacteurs biologiques comportent une section amont couverte pouvant être utilisée soit comme zone anoxie en cas de dénitrification organisée, soit comme volume complémentaire pour la nitrification.

En période de température normale (avec dénitrification), le brassage de cette zone est obtenu par recirculation du ciel gazeux par des groupes électro-surpresseurs spécialement affectés; dans le deuxième mode d'utilisation (réactivation des boues en retour), la zone anoxie est mise en communication avec l'atmosphère et l'air à insuffler est prélevé directement sur le réseau général; il se trouve ainsi régulé en fonction des besoins globaux.

Par tranche de 150 000 m^3 par jour, il est prévu deux lignes de traitement indépendantes et la conception des bassins d'aération a été largement influencée par les conditions de fondation: leur profondeur est de 8,30 m. Ils sont constitués d'une zone anoxie centrale de 28 m de diamètre, couverte, et de deux canaux d'aération concentriques d'une largeur de 10 m fonctionnant en série qui présentent une longueur développée d'environ 300 m. Le volume unitaire de la zone centrale anoxique est de 5000 m^3 alors que celui des canaux d'aération à l'air libre s'élève au total à 25000 m^3. L'oxygénation des bassins d'aération est assurée par insufflation d'air au moyen de diffuseurs à fines bulles de type DP 230 sous une immersion de 7,90 m avec une densité décroissante de l'amont vers l'aval.

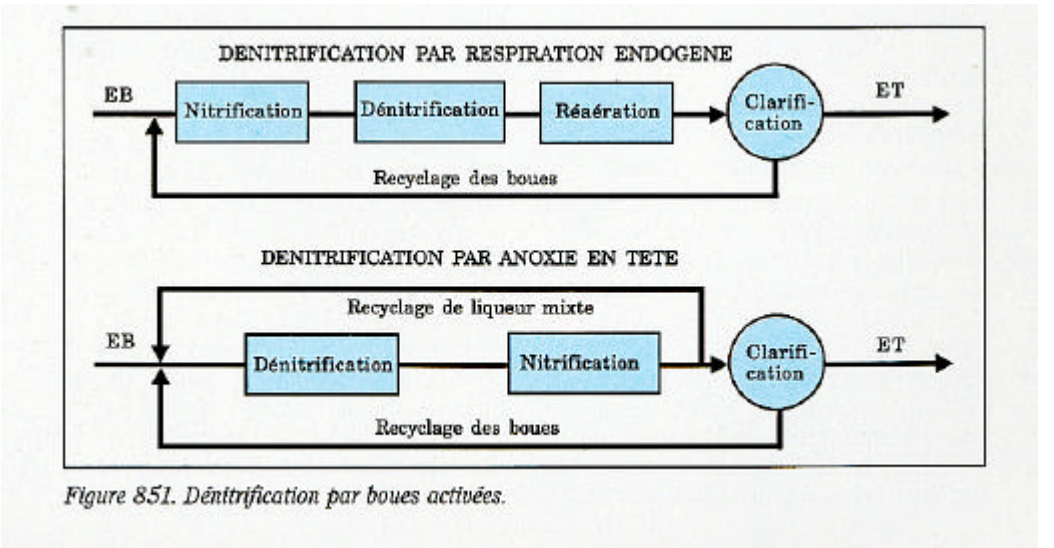


Figure 851. Dénitrification par boues activées.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 852. Installation de VALENTON (Val-de-Marne) pour le SIAAP. Capacité: 300 000 $m^3.j^{-1}$. Traitement des ERU de Paris et de la région parisienne. *Vue d'ensemble et des réacteurs biologiques pour nitrification et dénitrification.*

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 853. Installation de RIBEAUVILLE (Haut-Rhin). Capacité: 12 000 éq. hab. Traitement des ERU par nitrification-dénitrification.

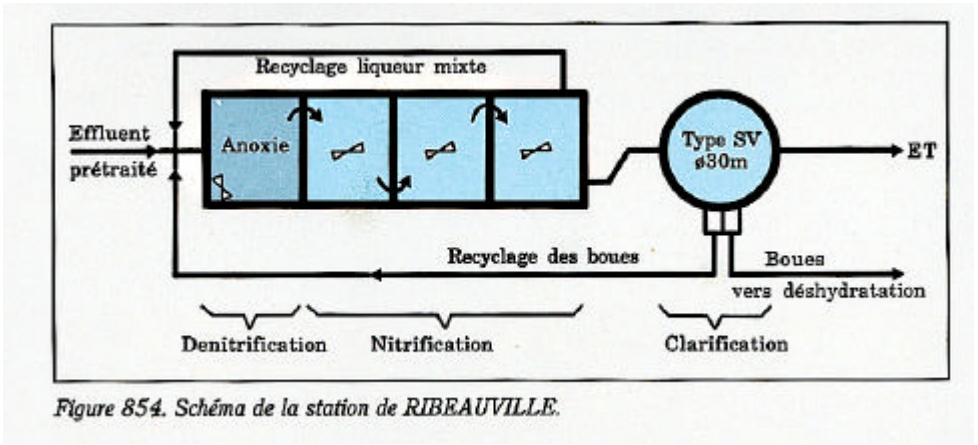


Figure 854. Schéma de la station de RIBEAUVILLE.

. Exemple 2 : station d'épuration de RIBEAUVILLE (figure 853).

La station traite un volume moyen journalier de 3 000 m^3 avec des exigences particulièrement sévères sur les rejets de MES, matières oxydables et surtout azotées, qui nécessitent une nitrification-dénitrification poussée (N-NTK < 5 $mg.l^{-1}$).

Le traitement biologique mis en œuvre sur les eaux brutes prétraitées comporte une zone anoxie en tête d'un volume de 590 m^3, suivie d'un bassin d'aération à cascades d'un volume de 2190 m^3 (figure 854) dont l'oxygénation est assurée par des aérateurs de surface ACTIROTOR.

Même à cette échelle modeste, un auto-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

mate programmable gère l'ensemble du fonctionnement (asservissement au débit et à une sonde de potentiel redox pour les aérateurs de surface).

. Exemple 3 : station d'épuration de la Communauté Urbaine de STRASBOURG (figure 855).

Après relèvement par vis d'Archimède et pré traitement, la station comprend

- une décantation primaire lamellaire (12 décanteurs SÉDIPAC U),
- un traitement biologique par BA à insufflation d'air,
- une clarification par décanteurs rectangulaires à succion (18 décanteurs type SLG).

La capacité des installations est, en première étape, de 242 000 $m^3.j^{-1}$ dont 60 d'origine industrielle. Le niveau d'épuration prescrit doit conduire à une concentration maximale en N-NTK de 10 $mg.l^{-1}$ en moyenne journalière, sans dépasser 15 $mg.l^{-1}$ sur un échantillon de 2 h. Pour **réduire** l'importance du volume d'aération, dimensionné pour satisfaire aux conditions de nitrification, une partie de ce volume est utilisée en réactivation des boues de retour. La réactivation est suivie d'une zone anoxie qui précède les bassins d'aération proprement dits (figure 856).

La station comprend trois lignes de traitement indépendantes. Chaque ligne (figure 856) comporte un bassin d'aération qui est constitué d'un ouvrage rectangulaire de 4,40 m de hauteur d'eau et de 117 m de longueur, comportant des cloisonnements intérieurs délimitant six canaux en série.

Les deux premiers (R_1, R_2), aérés, sont destinés à la réactivation; le suivant (AN), brassé mais non aéré, constitue la

Figure 855. Strasbourg municipal wastewater treatment plant serving the Strasbourg conurbation (eastern France). Capacity: 1,000,000 PE.

Figure 855. Installation de STRASBOURG (Haut-Rhin) pour la communauté urbaine de Strasbourg. Capacité: 1000 000 éq. hab. Traitement des ERU.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

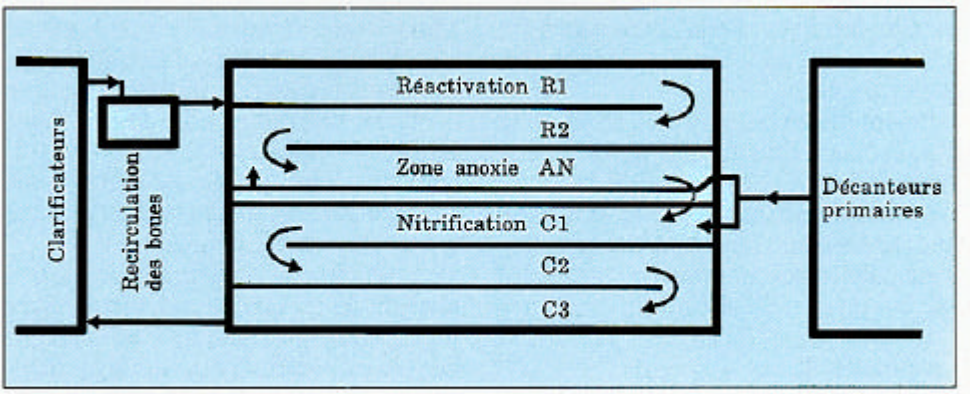


Figure 856. Schéma des bassins d'aération (flux piston) de STRASBOURG.

zone anoxie; enfin les trois derniers (C_1, C_2, C_3), aérés, incluent la zone de nitrification principale.

Le volume total de l'ouvrage est ainsi de 34350 m^3 et l'oxygénation est assurée par une diffusion d'air à fines bulles au moyen de disques poreux DP 230 à une profondeur d'immersion de 4 m.

1.5.4. Cas des cultures fixées

La nitrification peut être obtenue au moyen de cultures fixées. Dans le cas de **lits à ruissellement,** la nitrification est obtenue simultanément à l'oxydation de la DBO5 ou dans un deuxième stade. Celui-ci peut suivre un premier stade, soit

Figure 857. Municipal wastewater treatment plant by biological filtration in Aïre (Switzerland) for the city of Geneva. Flow rate: 90 $m^3.h^{-1}$. A pilot plant using the Biofor biological filter.

Figure 857. Installation d'AIRE (Suisse) pour la ville de Genève. Débit: 90 $m^3.h^{-1}$. Traitement des ERU par biofiltration. Station pilote avec BIOFOR.

Downloaded from https://hydraulicsnet.blogspot.com/

par BA, soit à lits bactériens. Bien que ceux-ci, chargés en matériau plastique, puissent atteindre 4 m de haut, leur dimensionnement est très important et cette solution est généralement coûteuse (voir page 311).

Sur lits granulaires, la nitrification est normalement mise en oeuvre après élimination de la DBO_5 dans un premier réacteur; les charges en N-NTK sont 2 à 3 fois supérieures à celles permises sur lits à ruissellement.

La figure 857 donne l'exemple d'une station de ce type comprenant deux réacteurs BIOFOR en série, chacun d'une surface unitaire de 21,5 m^2, chargés de BIOLITE (hauteur de couche: 3 m). Le premier traite un débit moyen de 90 $m^3.h^{-1}$; le deuxième un débit de 60 $m^3.h^{-1}$ issu du réacteur précédent. Les caractéristiques de l'eau traitée sont DBO5 = 25 $mg.l^{-1}$, NH_4^+ = 3 $mg.l^{-1}$, correspondant à des rendements d'élimination supérieurs à 89 % pour la DBO_5, 88 % pour les MES et 85 % pour N-NTK.

1.6. DÉPHOSPHATATION BIOLOGIQUE

La décantation primaire n'élimine que 10 % environ du phosphore contenu dans une ERU.

L'action bactérienne transforme des polyphosphates en orthophosphates directement assimilables. Dans une ERU brute, les 2/3 du phosphore total correspondent aux polyphosphates et 1/3 à l'orthophosphate. Dans l'effluent traité d'une station biologique classique cette proportion est inversée.

Les mécanismes de la déphosphatation par voie biologique sont exposés au chapitre 4, page 303 ; un certain nombre de procédés ont reçu des applications industrielles. Le point commun à tous ces procédés est que la biomasse est soumise d'abord à une phase d'anaérobiose au contact de carbone organique (eau brute),

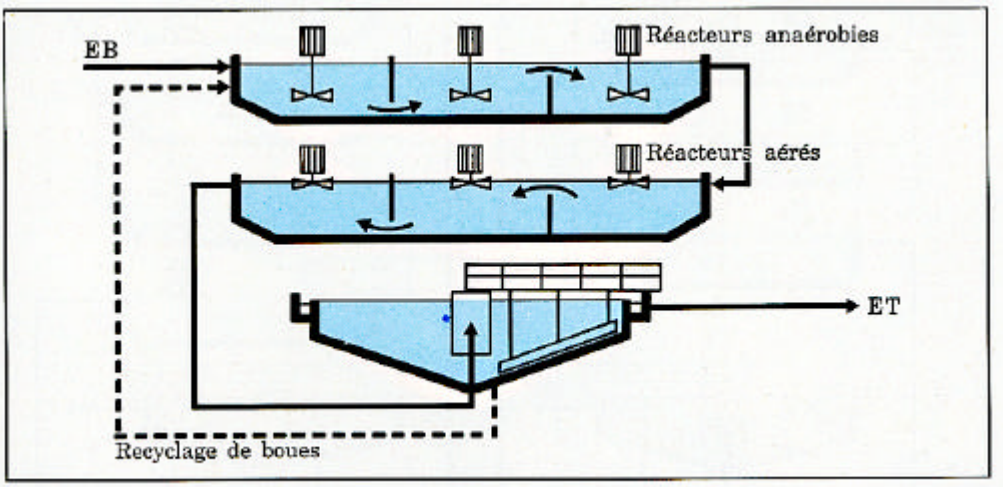


Figure 858. Le procédé A/O.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

puis à une phase aérobie au cours de laquelle le phosphore précédemment relargué est réassimilé en quantité nettement supérieure; il y a donc augmentation de la concentration en P dans les boues en excès et, par suite, de son élimination. Celle-ci se conjugue toujours avec l'élimination totale ou partielle de l'azote.

1.6.1. Procédé à 2 phases

Le procédé A/0 (voir figure 858) prévoyait une zone anaérobie à cellules multiples, couverte et brassée mécaniquement, alimentée en eau brute et boues recyclées du clarificateur. La boue activée passe alors dans une zone aérée comportant plusieurs compartiments en série. En incorporant une zone anoxie entre les deux réacteurs avec un recyclage de liqueur mixte, on obtient le procédé PHOREDOX modifié (voir page 1273).

Une variante consiste à introduire des BA recyclées, mélangées à une partie du débit d'eau brute, dans un décanteur raclé maintenu en phase anaérobie. Les boues et l'effluent de ce décanteur, ainsi que le complément d'eau brute, sont dirigées vers le bassin d'aération.

1.6.2. Procédés à 4 ou 5 phases

Le procédé à 4 phases **BARDENPHO** (figure 859) proposé par BARNARD, et conçu initialement pour la nitrification et la dénitrification, permet d'assurer une certaine déphosphatation, mais la difficulté de réaliser en amont une zone qui soit vraiment anaérobie, conduit au procédé à 5 phases **PHOREDOX (figure 860).**

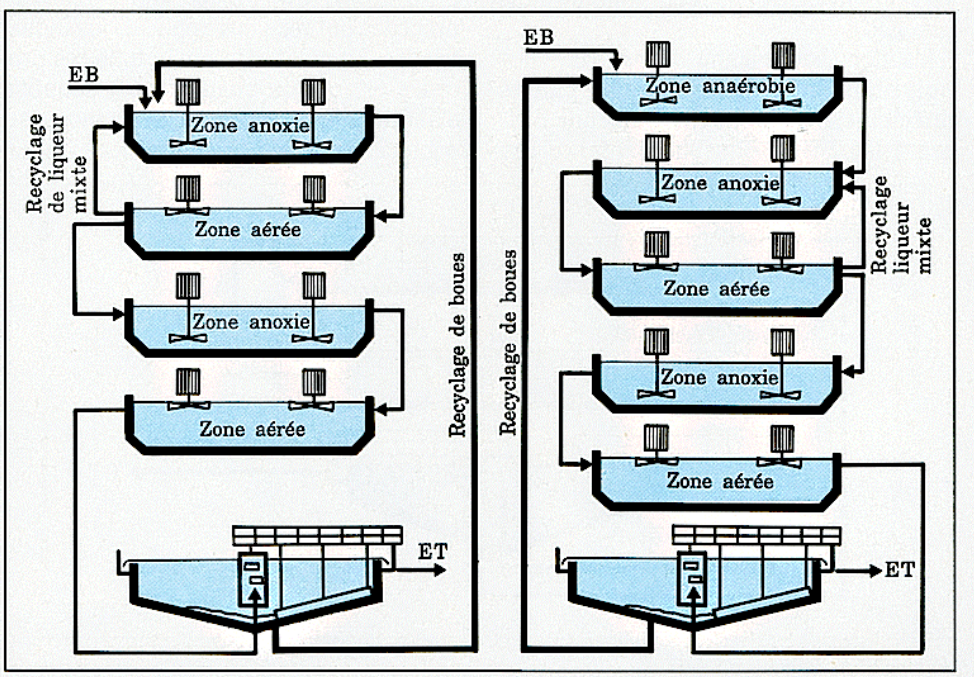


Figure 859. Procédé BARDENPHO.

Figure 860. Procédé PHOREDOX.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.6.3. Procédés à 3 phases

1.6.3.1. Procédé PHOREDOX modifié

La mise en œuvre à l'échelle industrielle du procédé PHOREDOX, qui comporte cinq bassins en série et un clarificateur, représente un coût d'investissement élevé. Plusieurs propositions de simplification ont ainsi été avancées, qui suppriment la seconde zone d'anoxie et la zone de réaération ; la perte de capacité dénitrifiante induite par cette modification peut être compensée par l'accroissement du volume de la première zone d'anoxie, dans laquelle le substrat organique est présent. Il donne des résultats pratiquement équivalents au précédent (figure 861).

1.6.3.2. Procédé UCT (University of CAPE TOWN).

Tous les procédés jusqu'alors décrits ont en commun la réintroduction, dans l'étape de tête, d'un certain débit contenant des nitrates, éventuellement de l'oxygène dissous, ce qui inhibe l'activité des bactéries acidogènes et donc la formation du substrat nécessaire au développement de la microflore poly-P.

Le procédé UCT (figure 862) devrait supprimer cet inconvénient par recyclage des boues du clarificateur dans une zone anoxie située après une zone anaérobie d'un système en trois stades. Normalement, la zone anaérobie ne reçoit que des effluents ne contenant pas de nitrates,

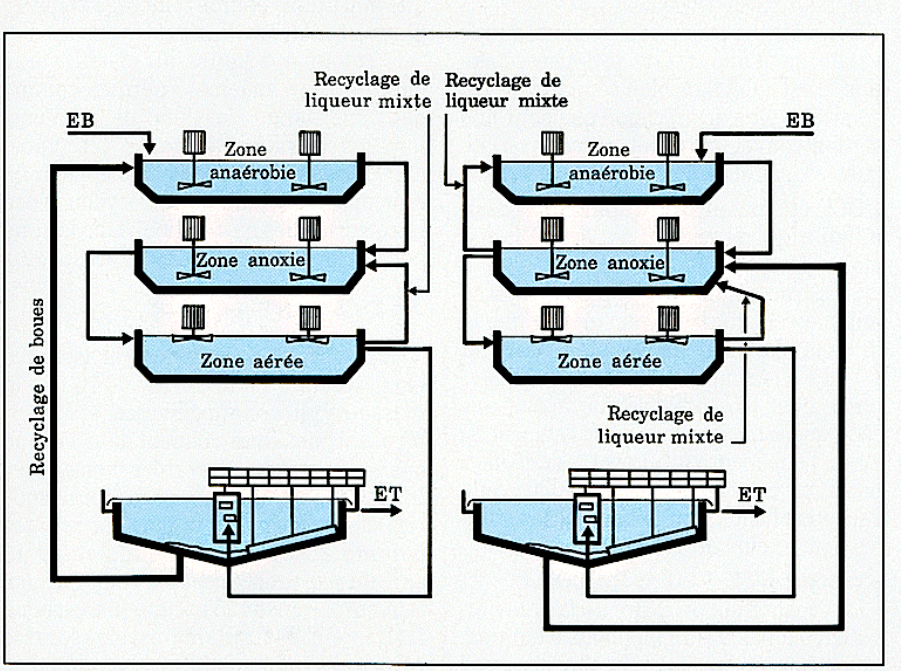


Figure 861. Procédé PHOREDOX modifié.

Figure 862. Procédé UCT.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tant que la zone anoxie dénitrifie tous les nitrates qui lui sont envoyés. En théorie, cette indépendance vis-à-vis de la concentration en nitrates dans l'effluent peut être maintenue pour des rapports NTK/ DCO voisins de 0,12 alors que pour le procédé PHOREDOX ce rapport doit être inférieur à 0,08 environ, correspondant à des eaux moins concentrées en azote.

1.6.4. Choix du procédé

La déphosphatation biologique est très dépendante des variations des caractéristiques des effluents, de la cinétique des réactions en jeu et de l'hydraulique des réacteurs anaérobie et anoxie. Par exemple, avec le schéma UCT, s'il est très important d'avoir un réacteur anaérobie à flux piston, cela l'est moins avec le schéma PHOREDOX.

Pour être à même de dimensionner valablement une station de déphosphatation, il est capital de bien connaître (avec beaucoup plus de précision que pour une station conventionnelle) les caractéristiques essentielles des effluents à traiter

. **DCO et surtout DCO rapidement assimilable** (qui représente, sur des ERU normales, 15-20 % de la DCO totale).

Si la fraction de DCO rapidement assimilable est inférieure, sur des effluents urbains français moyens, à environ 60 $mg.l^{-1}$, l'élimination biologique du phosphore n'est plus possible, par aucun procédé, quelle que soit la DCO de l'effluent. Si elle est supérieure à 60 $mg.l^{-1}$, la déphosphatation est d'autant meilleure que cette valeur est haute, pour autant que les nitrates sont exclus du réacteur anaérobie.

. rapport NTK/DCO et P/DCO.

La décantation primaire ne facilite normalement pas des rendements d'élimination élevés de l'azote et du phosphorecar elle augmente le rapport NTK/DCO et P/DCO. Elle permet par contre de réduire les volumes à mettre en œuvre et diminue la demande totale en oxygène.

. **alcalinité totale.**

. **températures** maximale et minimale.

Le schéma PHOREDOX modifié répond le mieux, a priori, et de façon simple, aux différentes exigences de la déphosphatation biologique

- la zone anaérobie permet, par l'absence d'oxygène, de provoquer le stress nécessaire au relargage du phosphore. La zone anoxie permet la dénitrification par utilisation du carbone organique de l'eau brute, - la zone d'aération permet la nitrification et l'élimination du carbone organique non utilisé pour le relargage du phosphore et la dénitrification,
- le retour des boues du clarificateur dans la zone anaérobie permet, comme dans une station classique, de maintenir une concentration de boues acceptable dans l'ensemble des bassins. Le retour de liqueur mixte permet le recyclage des nitrates, formés en aération, dans la zone anoxie pour être réduits en azote gazeux.

1.6.5. Limites d'emploi

La masse de DCO rapidement assimilable nécessaire est de l'ordre de 10 fois la masse de phosphore éliminée.

Les nitrates interviennent dans la zone anaérobie et peuvent perturber ou arrêter la déphosphatation biologique: les bactéries acétogènes vont utiliser les nitrates comme accepteur final d'électrons, suivant par conséquent les voies fermentatives produisant l'acétate; le carbone facilement assimilable est consommé prioritairement pour les réactions de dénitrification et n'est donc plus disponi-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

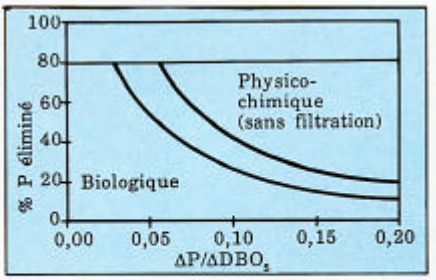


Figure 863. Association de traitements biologique et physico-chimique de déphosphatation sur des ERU françaises.

ble pour les mécanismes de relargage du phosphore.

Cela conduit, pour les ERU françaises habituelles, à n'assurer par voie biologique qu'entre 50 et 65 % d'élimination du phosphore. Pour atteindre des concentrations en P de l'ordre de 2 $mg.l^{-1}$ (ou inférieures) dans l'eau traitée, il faut envisager des solutions de traitement mixte où la part du phosphore restant est précipité par ajout de réactifs (voir page 1296). La figure 863 représente pour de telles eaux les parts respectives des déphosphatations biologique et physico-chimique dans la limite d'une élimination globale de 80 % du phosphore.

1.6.6. Exemple de réalisation

La capacité de la station de ROANNE (Loire) est de 30 000 $m^3.j^{-1}$ et dessert une population de 160 000 équivalents-habitants. Le procédé de déphosphatation biologique retenu est mis en oeuvre selon le schéma PHOREDOX modifié (figure 864), sur l'eau brute après un prétraitement classique.

La station comprend deux lignes de traitement en parallèle pour l'élimination des pollutions carbonée, azotée et phosphorée.

1.6.7. Précautions au niveau du traitement des boues

Un temps de séjour trop long dans des épaississeurs conduit inévitablement à des conditions anaérobies et donc à une possibilité de relargage du phosphore. Celui-ci se retrouve dans le surnageant qui est habituellement retourné en tête de l'installation; le recyclage d'effluents chargés en phosphore peut être évité

- en choisissant des techniques d'épaississement et/ou de déshydratation n'entraînant pas d'anaérobiose prolongée (épaississement par flottation, comme dans le cas de ROANNE),
- par précipitation du phosphore dans l'épaississeur au moyen de chaux, ser-

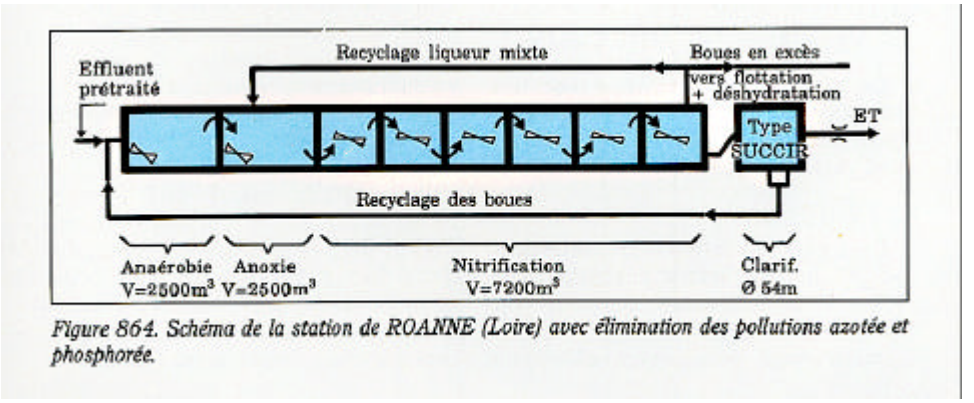


Figure 864. Schéma de la station de ROANNE (Loire) avec élimination des pollutions azotée et phosphorée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 865. Aerial view of the Roanne plant (central France). Capacity: 30,000 $m^3.d^{-1}$.

Figure 865. Installation de ROANNE (Loire). Débit: 30 000 m^3 j^{-1}. Vue d'ensemble.

vant également à réduire les problèmes d'odeurs.

Dans le même ordre d'idées, la précipitation par voie chimique du phosphore relargué dans le surnageant d'un épaississeur placé sur une partie des boues de retour, et maintenu en anaérobiose, permet d'appauvrir en phosphore les boues biologiques recyclées et d'intensifier l'assimilation de phosphore (procédé PHOSTRIP) par les boues activées dans le bassin d'aération. Ce procédé est différent de la simple précipitation chimique dans le bassin d'aération (voir page 1296).

1.7. MATIÈRES DE VIDANGE

Le chapitre 2, page 79, donne des valeurs indicatives sur les caractéristiques des matières de vidange, qui sont très variables d'un site à l'autre.

1.7.1. Traitement

Quel que soit le mode de traitement adopté, un prétraitement des matières de vidange est nécessaire. Ce poste doit comprendre

- un ouvrage de dépotage adapté au rythme de livraison avec comptage et dispositif de prévention des odeurs,
- un système de rétention des matières volumineuses ainsi que, pour les stations importantes, des sables et des graisses, - un dispositif de reprise et de régularisation du débit

Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de réduire la principale source d'odeur (H_2S et mercaptans). En dehors d'une précipitation possible sous forme de sulfure de fer, la disposition la plus fréquente est d'installer l'ensemble des équipements dans un bâtiment fermé avec

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

renouvellement de l'atmosphère et désodorisation de l'air extrait.

Les principaux modes de traitement sont:

1.7.1.1. Traitement commun avec les effluents municipaux

En France, les dispositions adoptées sont les suivantes

- admission en tête d'une station dotée d'une épuration biologique,
- débit journalier de matières de vidange inférieur à 2 % du débit journalier de temps sec de la station,
- charge en DBO_5 apportée par ces matières inférieure à 20 % de la charge nominale journalière de la station.

Cette solution, la plus usuelle, ne permet pas d'atteindre des objectifs de qualité élevée en matière de pollution azotée, sauf dispositions particulières. Il est recommandé de moduler l'admission de ces matières dans la filière de traitement d'eau en fonction de la variation journalière de la charge apportée par le réseau.

1.7.1.2. Traitement séparé à l'oxygène pur

Il ne constitue généralement qu'un premier stade de traitement. L'oxygène pur, qui permet d'atteindre des capacités d'oxygénation très supérieures à celles possibles avec de l'air, est bien adapté au traitement des matières de vidange concentrées. Cette technique permet également un meilleur contrôle des odeurs. Des charges volumiques en DBO_5 élevées sont possibles: de 3 à 4 kg/ m^3.j. Des concentrations de BA élevées de 15 à 20 $g.l^{-1}$ peuvent être atteintes avec des rendements d'élimination supérieurs à 90 % sur la DBO_5 et 80 % sur la DCO. L'élimination de la pollution azotée reste faible.

L'emploi d'oxygène pur nécessite une très bonne élimination des hydrocarbures et des graisses; la montée en température du réacteur doit être prise en compte.

1.7.1.3. Traitement séparé par voie anaérobie

Cette filière est encore très utilisée en Extrême-Orient. La digestion est souvent réalisée en deux étages avec un temps de séjour de 30 jours pour une température des réacteurs de 35 °C. Le surnageant des digesteurs présente une DBO_5 de 2 à 3 $g1^{-1}$; il est alors dirigé, après dilution, vers un deuxième stade de traitement biologique aérobie, présentant un temps de séjour de 6 à 8 h, correspondant à une charge volumique en DBO_5 de 0,4 à 0,6 $kg/m^3.j^{-1}$

1.7.1.4. Traitement par floculation-décantation

Ce traitement, qui ne constitue qu'un premier stade, n'est applicable que sur des matières de vidange diluées. Le sulfate ferreux (précipitation de (H_2S et la chaux sont les agents de séparation le plus souvent mis en oeuvre

1.7.1.5. Autres traitements

La digestion aérobie par simple aération est envisageable avec des temps de séjour de l'ordre de 12 jours.

La combustion humide (wet oxidation) avec introduction d'air dans un réacteur sous pression à une température de 250 °C environ est aussi applicable, mais elle conduit à des surnageants plus concentrés que les précédents.

1.7.2. Exemples de réalisation

. Exemple 1: traitement commun avec les effluents municipaux

Station du cours Louis-FARGUE à BORDEAUX (Gironde)

Cette station d'épuration biologique (avec bassins compacts OXYRAPID) traite un débit de 90 000 $m^3.j^{-1}$ correspondant à une population de 300 000 habitants

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

(figure 866). Elle comporte un ouvrage de réception des matières de vidange pour un volume de 350 m³ sur 12 h, équipé de huit bouches de dépotage. Un bâtiment fermé abrite le prétraitement avec désodorisation de l'air de ventilation (lavage à la soude). Il comprend un dégrillage, un dessablage et une homogénéisation avec apport d'eau de dilution (100 $m^3.h^{-1}$ d'effluent épuré). Ces matières sont alors pompées en tête de la station de traitement où elles sont mélangées aux effluents bruts.

. Exemple 2 : traitement séparé

SIVOM de PILE D'OLÉRON (Charente Maritime).

La production annuelle de matières de vidangé dans cette région, à flux touristique important, s'élève à 35 600 m3 se répartissant comme suit - haute saison (juillet-août): 24 600 m3 dont: matières de vidange concentrées DBO5 = 6 g.l-1) : 150 m^3 j^{-1} matières de vidange diluées DBO_5 = 1 $g.l^{-1}$) : 340 $m^3.j^{-1}$

- hors saison: 11000 $m^3.j^{-1}$, soit environ 40 $m^3.j^{-1}$ de matières concentrées.

Les traitements, mis en œuvre dans deux filières séparées, permettent de produire des effluents susceptibles d'être acceptés sur la station d'épuration traitant les eaux usées de l'agglomération, dimensionnée en conséquence.

L'objectif est d'obtenir une réduction de pollution moyenne, exprimée en DBO_5, de 90 % sur les matières de vidange concentrées et de 40 à 50 % sur les matières de vidange diluées (figure 867).

. Exemple 3 : traitement combiné

Station de METAMORPHOSIS ATTIQUE/ ATHÉNES (Grèce).

Dans cet exemple, il est prévu, sur un même site, le traitement complet de 20 000 $m^3.j^{-1}$ d'ERU (65 000 éq. hab.) et de 24 000 M^3 J^{-1} de matières de vidange fraîches très diluées (caractéristiques en $mg.l^{-1}$: DBO_5 = 1200, DCO = 4 000,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 866. Installation du cours Louis-Fargue à BORDEAUX (Gironde) pour la Communauté Urbaine de Bordeaux. Capacité: 90 000 $m^3.j^{-1}$. Vue générale.

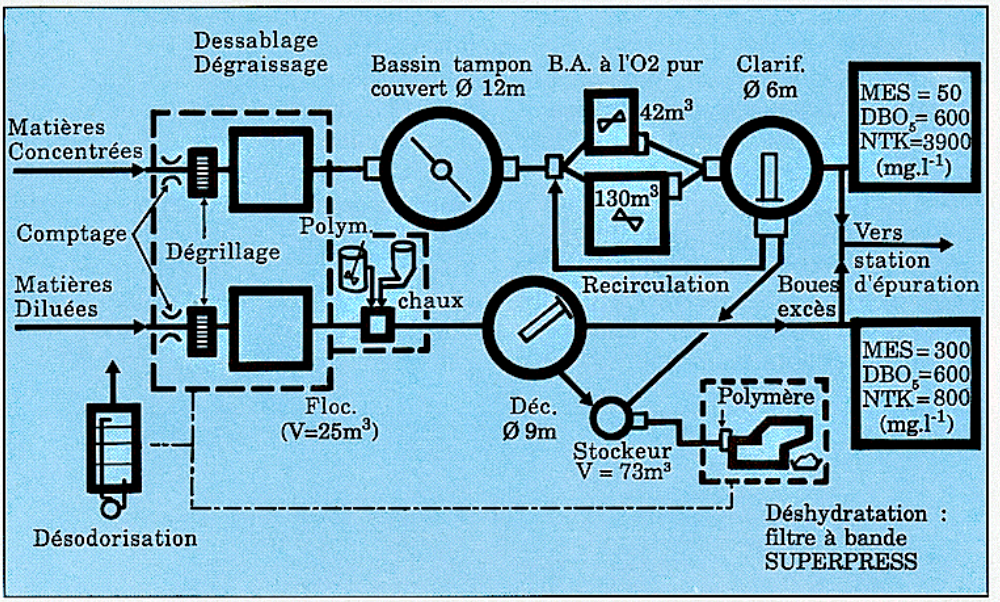


Figure 867. Schéma de la station de traitement de matières de vidange du SIVOM de l'ILE D'OLÉRON (Charente-Maritime).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 868. Installation de METAMORPHOSIS/ATTIQUE (ATHÈNES), Grèce. Traitement d'ERU et de matières de vidange. Aire de dépotage (2 x 15 camions-citernes de 20 m^3 simultanément).

MES = 2 300, N-NTK = 320 dont NH_4^+ = 290).

Les matières de vidange, après un prétraitement classique avec élimination de (H_2S par adjonction de sulfate de fer sont floculées à la chaux puis décantées et épaissies (figure 869).

Les rendements d'élimination des MES sont de 85 à 90 % et ceux de la DBO_5 de 65 à 70 %. Le surnageant clarifié est alors épuré par BA en même temps que les ERU prédécantées. L'effluent final présente une DBO_5 < 20 $mg.l^{-1}$ et une teneur en MES < 30 $mg.l^{-1}$.

Les boues en excès de la station d'épuration biologique, collectées en décantation primaire, sont pompées et introduites en digestion en même temps que les boues issues de la clarification des matières de vidange. Les boues digérées sont alors déshydratées sur quatre SUPERPRESS de 3 m de largeur de bande après floculation aux polymères. La siccité du gâteau est comprise entre 29 et 33 %.

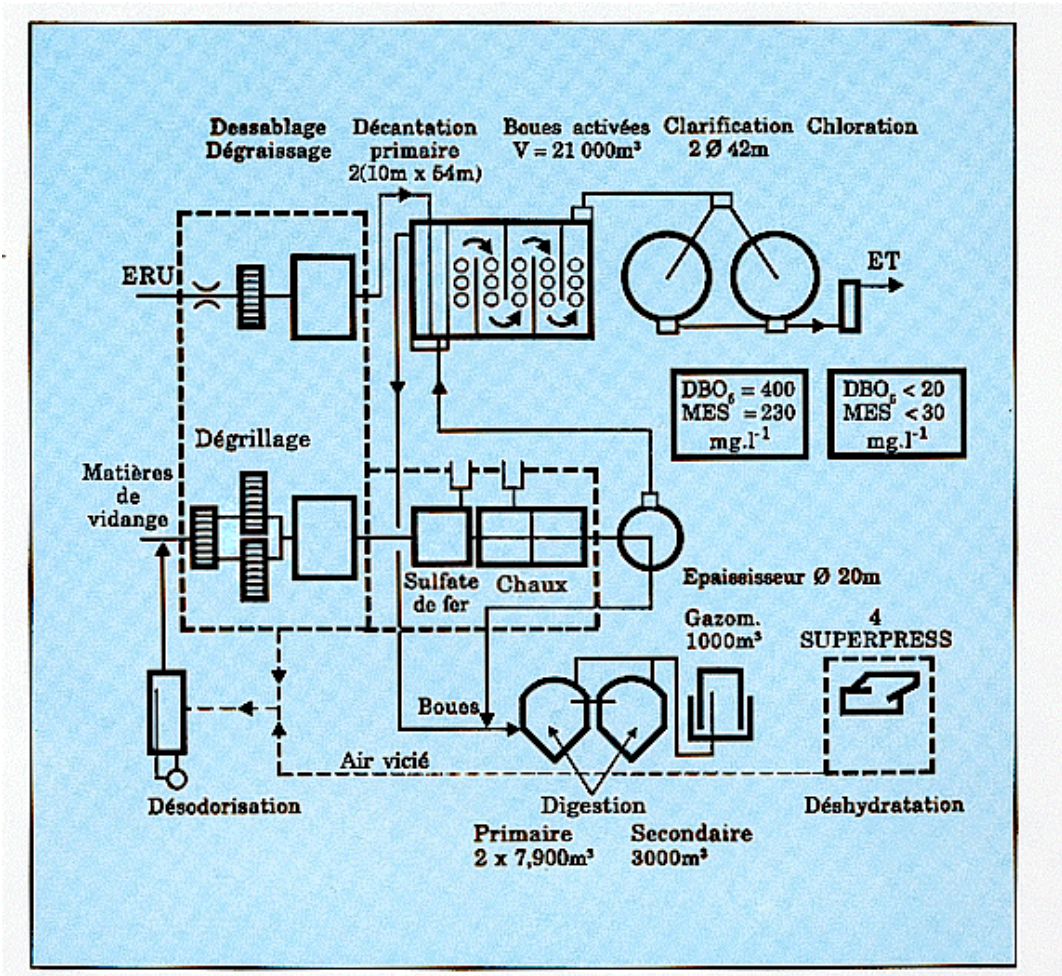


Figure 869. Schéma de traitement de l'installation de METAMORPHOSIS/ATTIQUE (ATHÈNES), Grèce.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 870. Installation de METAMORPHOSIS/ATTIQUE (ATHÈNES), Grèce. Vue du bâtiment commun de prétraitement des matières de vidange et des eaux résiduaires.

1.8. CONDUITE DE L'ÉPURATION

La qualité de l'épuration biologique obtenue sur une station est loin de dépendre seulement de paramètres biologiques. Deux conditions essentielles doivent être respectées pour pouvoir optimiser le rendement d'un réacteur biologique

- **le dimensionnement hydraulique** des ouvrages de la station doit être correct, en particulier celui des décanteurs secondaires de boues activées,

- **l'évacuation normale des boues en excès** doit pouvoir être assurée sans contrainte et l'installation de traitement de boues présenter une capacité suffisante.

En amont de l'épuration biologique, le prétraitement et la décantation (primaire) de l'eau brute exigent, pour être efficaces et éviter une surcharge de l'épuration biologique, que les résidus et les boues primaires soient évacués régulièrement

1.8.1. Essai de décantation

Le test de décantation des boues activées, conduisant à la détermination de **l'indice de MOHLMAN** (IM), appelé

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

aussi Sluge Volume Index (SVI), est un des contrôles de routine les plus importants (voir page 162). Il permet:

- d'apprécier la décantabilité de la boue (et la qualité optique du surnageant),
- de déterminer approximativement par défaut le débit de recyclage de boues nécessaire Qr pour maintenir une concentration C en g.l-1 dans la liqueur de boues activées du bassin d'aération

$$\frac{Qr}{Q} = \frac{C.IM}{1000 - C.IM}$$ avec IM exprimé en $cm^3.g^{-1}$ mais Qr ne doit pas dépasser la valeur limite au-delà de laquelle les turbulences créées dans le décanteur deviennent excessives.

Une autre formule empirique permet d'approcher la concentration maximale possible Cr max des boues recirculées

$$C_{r\,max} = \frac{1\,200}{IM}$$

Afin d'améliorer la représentativité de l'IM il est recommandé de l'établir sur un échantillon de boues conduisant à un volume de boues final, après décantation de 30 minutes, compris entre 150 et 300 $cm^3.g^{-1}$; une dilution préliminaire en eau épurée est alors parfois nécessaire.

1.8.2. Contrôle de l'oxygène dissous

Ce contrôle est essentiel dans les procédés par BA, afin d'ajuster la fourniture d'oxygène aux besoins. L'usage généralisé des sondes électrométriques a permis de multiplier aisément les points de mesure.

Les bassins à mélange intégral sont sur ce point favorisés et normalement une mesure d'oxygène dissous en un seul point du bassin permet de fournir un signal représentatif au dispositif de production d'oxygène à réguler. Il n'en est pas de même sur les bassins à alimentation étagée et à flux piston. Suivant l'importance de l'installation, on choisit des mesures en plusieurs points du bassin ou la mesure en un seul point. Dans le premier cas, une comparaison ou une pondération des signaux reçus permet la définition des besoins en oxygène. Dans le deuxième cas, l'emplacement définitif n'est adopté qu'après une phase expérimentale plus ou moins longue d'observation et d'optimisation, qui doit prendre en compte, en particulier, les variations dues aux fluctuations du débit au cours de la journée.

La teneur en O_2 dissous à la sortie du bassin d'aération doit être largement positive (> 1,5 $mg.l^{-1}$) afin d'éviter les phénomènes de fermentation ou de dénitrification dans les décanteurs secondaires. Les taux d'oxygène à maintenir dans les autres zones du bassin dépendent du schéma hydraulique de celui-ci ainsi que du type de traitement (en particulier zones anoxie et anaérobie en cas de dénitrification et déphosphatation). Dans le cas de la seule élimination de la pollution carbonée, la teneur en O_2 mesurée par la sonde doit être toujours supérieure à 0,5 $mg.l^{-1}$. Dans les zones de nitrification, il est parfois nécessaire de porter cette teneur au-dessus de 2 $mg.l^{-1}$; la mesure du potentiel redox est alors un moyen de contrôle très utile car il peut fournir une indication sur l'évolution des teneurs en $N\text{-}NH_4$ et $N\text{-}N0_3$.

1.8.3. Foisonnement et moussage des boues activées

Ces deux phénomènes peuvent conduire à une baisse brutale de la qualité de l'eau épurée par entraînement massif de MES hors du décanteur secondaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.8.3.1. Le foisonnement (ou "bulking") est dû au développement de bactéries filamenteuses s'enchevêtrant les unes dans les autres, décantant très lentement et épaississant mal; les boues "gonflent". Le volume occupé par la boue est important alors que le peu d'eau interstitielle libérée par cette masse de boue très réticulée est limpide. L'IM, dont la valeur optimale est normalement comprise entre 50 et 100 $cm^3.g^{-1,}$ peut atteindre 500 $cm^3.g^{-1}$ et plus.

Les micro-organismes filamenteux rencontrés sont très variés: bactéries telles que: Sphaerotilus natans, Thiotrix sp, Lactobacillus sp, Microthrix parvicella, Nocardia, types 0041, 0092, 021N,1701, de la clé d'identification d'EIKELBOOM ; champignons tels que Leptomitus sp, Geotrichum candidum. Ce phénomène peut se manifester pour des charges massiques très variées; il n'est pas du tout exclu sur des systèmes à faible chargé ou d'aération prolongée, il est cependant très peu fréquent sur des systèmes à très haute charge (Cm> 1 kg DBO_5/kgMES.j) pour lesquels la faible qualité de l'eau interstitielle est due plutôt à une floculation incomplète.

L'apport de coagulants (sels de fer par exemple) peut permettre d'améliorer la décantabilité des boues, mais ce remède est coûteux et ne convient normalement que pour des foisonnements de boue temporaires. L'élimination plus ou moins poussée des organismes filamenteux peut aussi être recherchée par apport d'oxydants dans les BA, généralement au niveau de la recirculation : le chlore dosé à quelques grammes par m^3 est le plus
souvent utilisé. Le grand rapport surface masse des organismes filamenteux les rend en effet particulièrement sensibles aux agents oxydants.

Le déséquilibre (excès de sucres, d'amidons) et la carence en agents nutritifs (N,P) des substrats sont aussi des causes de gonflement des boues activées - cas de IAA par exemple.

Toutefois, c'est dans l'organisation hydraulique du réacteur et dans les conditions d'oxygénation, créant un environnement favorable au développement d'organismes filamenteux, qu'il faut rechercher d'abord la cause du phénomène. La technique du "sélecteur" est souvent efficace; elle consiste à faire précéder le réacteur biologique d'une zone de mélange de faible durée (inférieure à 15 min) où les boues recirculées sont mises en contact, sous aération, avec la totalité de l'effluentbrut. Le but recherché est de favoriser le développement des bactéries floculantes au détriment des bactéries filamenteuses, dont le taux de croissance est plus faible dans un milieu très riche en matière organique rapidement assimilable.

1.8.3.2. Le moussage se caractérise par le développement d'une écume plus ou moins épaisse en surface du bassin d'aération.

Il est souvent associé au développement de bactéries filamenteuses et/ou à une dégradation incomplète de la MO (polypeptides en particulier) conduisant à la formation de composés fortement tensioactifs. Des conditions de brassage (et d'oxygénation) insuffisantes, des potentiels redox trop bas, des concentrations trop élevées en MES (en particulier de graisses), favorisent la formation de ces écumes. L'organisation hydraulique du réacteur et des circuits de liaison au décanteur secondaire doit aussi être prise en compte.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.8.4. Dopage du système épurateur

Les caractéristiques particulières de l'effluent à traiter, le dimensionnement insuffisant ou la conception défectueuse de l'installation, peuvent amener à faire appel, de façon temporaire ou permanente, à des agents extérieurs au processus classique de l'épuration biologique. En dehors de l'apport d'agents nutritifs sur des effluents industriels carencés,

façon à maintenir des rapports $\frac{DBO_5}{N}$ et $\frac{DBO_5}{P}$ voisins respectivement de 20 et P 100, on peut citer trois principaux moyens de "dopage"

. **Agents coagulants et floculants**

Ceux-ci ont pour but d'améliorer la clarification ou la qualité de l'eau interstitielle en cas de dispersion du floc biologique. Leur emploi est rare sur des effluents urbains, il l'est moins sur des effluents purement industriels (exemple: chimie de synthèse). L'application la plus courante est celle de la déphosphatation chimique par précipitation simultanée (voir page 1296).

. **Charbon actif**

L'apport de CAP (à des doses de 10 à 50 g.m-3) dans les BA est parfois expérimenté dans un double but

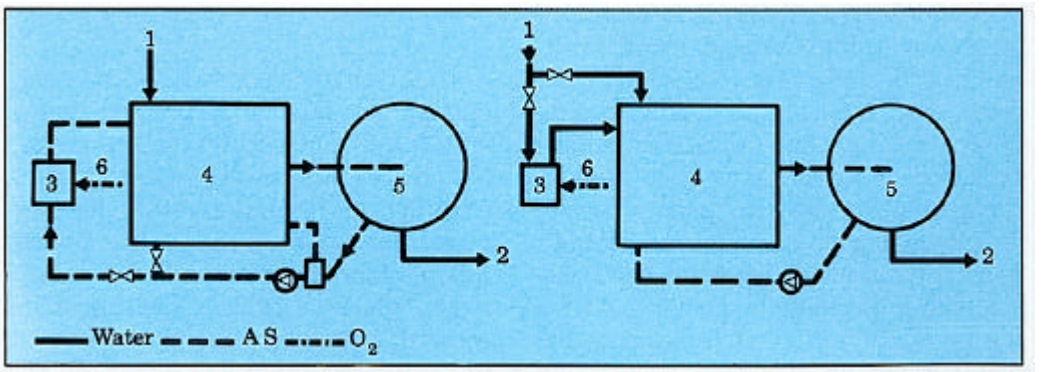
- diminuer la pollution organique non biodégradable et adsorber des éléments qui sont toxiques pour les micro-organismes,
- alourdir les boues activées et faciliter leur décantation.

La régénération du charbon perdu dans les boues en excès par combustion humide des matières adsorbées a été proposée.

Cet apport de CAP, envisageable sur certains effluents de l'industrie chimique, n'est pas mis en oeuvre sur des effluents purement domestiques. Le gain obtenu sur le rendement d'épuration ne justifie généralement pas le fort accroissement des dépenses d'exploitation.

. **Oxygène pur**

Éventuellement, un déficit saisonnier, en oxygène, d'une installation, peut être compensé par apport d'oxygène pur (figure 871). Les plus forts taux d'utilisation de l'oxygène pur introduit sont obtenus avec des bassins fermés (voir page 713).



1 - Eau brute. *3 - Cellule de suroxygénation* *5 - Clarificateur.*
2 - Eau traitée. *4 - Cellule d'aération.* *6 – O_2 pur.*

Figure 871. Schémas d'apport d'oxygène complémentaire en cellule séparée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.8.5. Principes de régulation de l'épuration biologique

Lorsque l'automatisation d'une installation d'épuration par BA est recherchée, les priorités suivantes sont à respecter

- répartition des débits entre les différentes lignes de traitement,
- commande des dispositifs d'oxygénation de façon à
- maintenir les teneurs en oxygène dissous recherchées (voire les rH) dans la BA entre les valeurs minimale et maximale recherchées aux points stratégiques du réacteur, compatibles avec le schéma de traitement adopté,
- réduire les dépenses d'énergie.
- contrôle du lit de boue et/ou de la qualité de l'eau surnageante dans les décanteurs secondaires (avec possibilité d'action sur le débit d'alimentation, et éventuellement sur le débit de boues recirculé),
- extraction des boues en excès à un débit constant ou programmé tout au long de la journée, avec modulation possible en fonction du débit traité, du niveau de lit de boue dans les décanteurs secondaires, de la concentration en MES de la liqueur de boue activée, voire d'une mesure représentative de la concentration en pollution de l'effluent brut

La mesure en continu, fiable, d'un paramètre représentatif de la pollution, demeure l'obstacle principal à une commande optimisée de l'épuration. Cet inconvénient ne doit cependant pas être exagéré, tout au moins sur les installations d'épuration d'ERU, du fait des temps de séjour importants et de l'inertie du processus épuratoire. .

Le contrôle des paramètres hydrauliques de fonctionnement demeure ainsi prioritaire après celui des conditions d'oxygénation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. TRAITEMENTS PHYSICO-CHIMIQUES

2.1. GÉNÉRALITÉS

L'expression "traitement physico-chimique" correspond le plus souvent à un traitement appliqué aux eaux résiduaires brutes et comportant une floculation ou une précipitation, suivie d'une séparation liquide - solide par décantation ou flottation.

Ces procédés peuvent s'utiliser seuls et ne permettent alors qu'une épuration partielle. Ils peuvent aussi précéder un traitement biologique par boues activées: dans ce cas, leur rôle est de réduire la charge polluante appliquée sur ce stade d'épuration, soit en permanence, par exemple dans les traitement d'eaux résiduaires mixtes urbaines et industrielles très chargées, soit temporairement dans le cas des stations d'épuration à population très variable. Ils constituent en outre le prétraitement idéal pour une épuration par cultures fixées et sont fréquemment mis en œuvre dans ce dernier cas.

Les progrès de la décantation lamellaire, et la mise au point de nouveaux floculants ou adjuvants, ont conduit à un regain d'intérêt de ces procédés.

Avantages	Inconvénients
. Réponse pratiquement immédiate aux variations de charge.	. Rendement d'épuration inférieur à l'épuration biologique (pas d'élimination de la pollution dis soute).
. Rendement d'épuration plus élevé qu'une seule décantation primaire.	. Plus grande quantité de boues produites.
. Bonne élimination de la pollution particulaire.	. Coût des réactifs.
.Compacité des installations, meilleure intégration au site.	. Risque de coloration (sels de fer sur eaux septiques).
. Déphosphatation simultanée.	

L'expérience montre que la nature et les doses de réactifs à employer sont très variables d'une eau résiduaire à une autre: les essais préliminaires de floculation sont de ce fait très utiles. Quelques règles générales se dégagent:

- **Les polyélectrolytes de synthèse** sont très spécifiques; employés seuls, ils permettent de floculer une fraction des colloïdes. Pour des eaux résiduaires diluées et fraîches, ce sont des produits anioniques qu'il convient d'utiliser, alors que pour

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

des eaux concentrées et septiques, ce sont des produits cationiques; l'emploi de ces derniers en flottation est courant

Après sélection adéquate du produit et de sa dose, les rendements d'élimination par décantation peuvent atteindre 60 % pour la DBO_5 et 75 % pour les MES; aussi les polyélectrolytes de synthèse s'utilisent-ils la plupart du temps pour améliorer la floculation en combinaison binaire, avec un sel métallique comme le chlorosulfate ferrique, ou ternaire en y ajoutant de la chaux.

- les sels de fer et d'aluminium peuvent s'employer avec des polyélectrolytes ou avec de la chaux; la première combinaison est favorable à la flottation et la seconde à la décantation. Pour une eau

résiduaire donnée, il est possible de tracer des courbes de rendement d'élimination de MES et de DCO ou de DBO_5 en fonction des doses de réactifs ou des doses d'adjuvant, (figures 872 et 873). On peut espérer atteindre des rendements de 75 % sur la DBO_5 et de plus de 90 % sur les MES. Comme pour les eaux de surface, les doses de floculants à appliquer sont influencées par la température. - le traitement à la chaux, à pH élevé (pH 11,5 au minimum), avec apport modéré de sels de fer, permet d'obtenir un résultat équivalent à celui de la méthode précédente et, en outre, d'assurer une réduction importante des germes. Cependant, l'eau ainsi traitée doit normalement être neutralisée avant rejet ou passage dans un stade d'épuration biologique ultérieur, ce qui entraîne une consommation de réactifs acides. En outre, la modification de l'équilibre calcocarbonique de l'eau due à l'apport de chaux à haute dose peut la rendre incrustante et provoquer des dépôts dans les appareils et des concrétions dans les conduites.

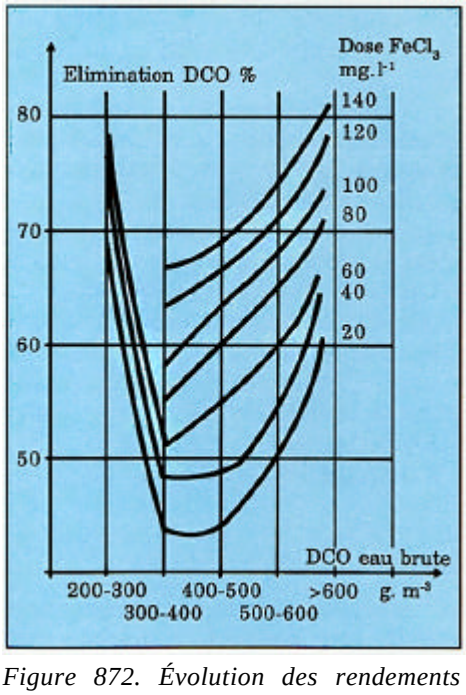


Figure 872. Évolution des rendements d'élimination de la DCO en fonction de la concentration des eaux brutes et de la quantité de chlorure ferrique injecté (station de CANNES)

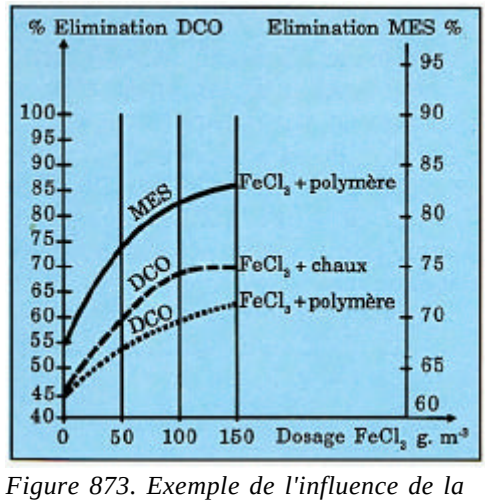


Figure 873. Exemple de l'influence de la dose de chlorure ferrique sur le rendement de la floculation décantation

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2. FLOCULATION ET SÉPARATION

Une certaine floculation "mécanique", ou hydraulique, des ERU, sans apport de réactifs, améliore le rendement de la décantation statique en favorisant les contacts entre les particules en suspension.

La floculation chimique des ERU suit des règles assez semblables à celles de la floculation des eaux de surface et les dispositifs de mise en œuvre peuvent être relativement simplifiés car le nombre important de particules présentes facilite lés contacts.

Alors que le tamisage donne des résultats aléatoires et difficilement prévisibles, la décantation statique permet une bonne séparation lorsque les boues sont lourdes. Dans les décanteurs cylindro-coniques, il est risqué de prévoir des vitesses ascensionnelles supérieures à 1,5 $m.h^{-1}$ avec des polyélectrolytes employés seuls et 2 $m.h^{-1}$ lorsque l'on utilise des sels métalliques. L'emploi de chaux comme adjuvant facilite en général la décantation mais son usage n'est, le plus souvent, pas indispensable.

Les décanteurs à recirculation interne de boues tels que le TURBOCIRCULATOR ou le CLARICONTACT peuvent accroître les vitesses et diminuer les doses de réactifs.

L'utilisation de décanteurs lamellaires SÉDIPAC permet des charges hydrauliques pouvant atteindre en pointe 15 $m^3/m^2.h$. Le prétraitement doit alors comporter un dégrillage fin et un dégraissage soigné.

La combinaison d'un dispositif lamellaire avec un appareil de décantation à recirculation de boues (DENSADEG) constitue un ensemble compact autorisant des charges hydrauliques en pointe de 20 $m^3/m^2.h$.

L'inconvénient de nombreux dispositifs de décantation lamellaire est de produire une boue peu concentrée qu'il est ensuite nécessaire d'épaissir. Si cette boue contient des hydroxydes de fer ou d'aluminium, l'épaississement est lent et ne permet pas, à moins de rajouter des réactifs, d'atteindre une concentration en MES supérieure à 3 5-40 $g.l^{-1}$. Le DENSADEG, qui comporte un épaississeur incorporé, a le grand avantage de produire des boues suffisamment concentrées pour être extraites et dirigées directement vers l'atelier de déshydratation.

La flottation par air dissous a également le mérite d'aboutir à la formation d'une boue concentrée (MES > 50 $g.l^{-1}$) sans épaississement complémentaire. Elle se limite par contre à des vitesses en pointe de l'ordre de 10 $m.h^{-1}$ et nécessite souvent l'emploi de réactifs spécifiques (polyélectrolytes cationiques) facilitant l'accrochage des micro bulles d'air sur les flocs.

2.3. PHYSICO-CHIMIQUE + CULTURES FIXÉES

L'association d'un traitement physico-chimique et d'un traitement biologique placé en aval conduit à des rendements d'épuration très élevés. La mise en oeuvre d'une étape biologique par cultures fixées permet la réalisation d'un ensemble d'épuration compact répondant très rapidement aux variations de charge.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le traitement par cultures fixées peut être réalisé par apport d'oxygène dissous au préalable dans l'eau à traiter (figures 874 et 875), ou par introduction d'air dans le réacteur: procédés BIOFOR et BIODROF.

La combinaison DENSADEG-BIOFOR est particulièrement performante. Elle est mise en oeuvre par exemple à GRÉOUX-LES-BAINS (figures 877 et 878), station thermale de 2 000 habitants sédentaires, 20 000 habitants en saison. La station est alimentée par pompage pour un débit variant de 75 $m^3.h^{-1}$ à 400 $m^3.h^{-1}$.

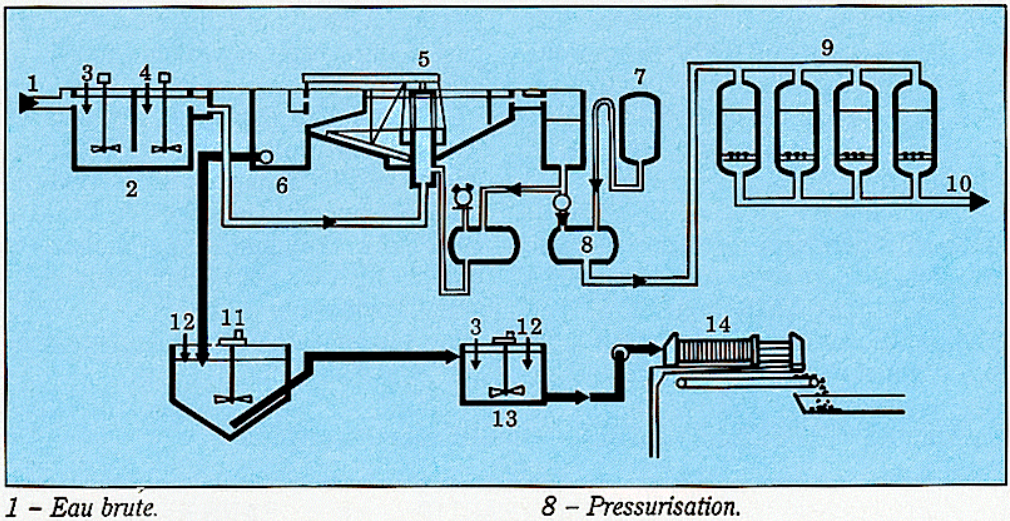
La figure 878 donne les résultats de fonctionnement avec et sans réactifs pour un débit de 75 m^3h^{-1} sur une période de 24 h. Elle montre l'efficacité du DENSADEG pour l'élimination particulaire et celle du BIOFOR pour l'élimination de la pollution dissoute.

Les rendements obtenus sont résumés sur le tableau 85.

Tableau 85. GRÉOUX-LES-BAINS - Rendements d'épuration

		AVEC RÉACTIF		SANS RÉACTIF	
		DENSADEG seul	**DENSADEG + BIOFOR**	**DENSADEG seul**	**DENSADEG + BIOFOR**
Turbidité	%	66	95	26	88
MES	%	75	96	51	91
DCO totale	%	51	82	23	81
DCO soluble	%	11	47	0	43

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

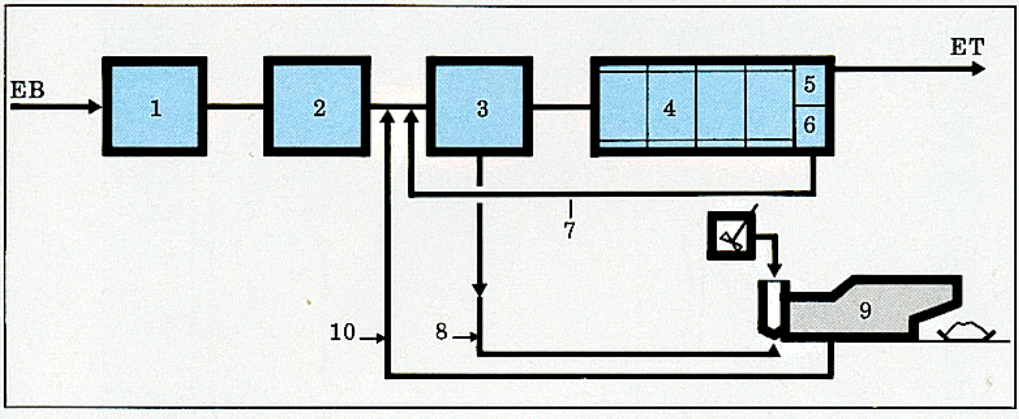


1 – Eau brute.
2 – Bassin de floculation.
3 – Coagulant.
4 – Floculant.
5 – SÉDIFLOTAZUR.
6 – Puits à boues flottées.
7 – Oxygène pur.
8 – Pressurisation.
9 – Filtration.
10 – Eau traitée.
11 – Stockeur de boues.
12 – Lait de chaux.
13 – Bâche de conditionnement.
14 – Filtre-presse.

Figure 874. Schéma de fonctionnement de l'installation d'épuration de BRIANCON-SERRE-CHEVALIER (Hautes-Alpes).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 875. Installation de BRIANCON-SERRE-CHEVALIER (Hautes-Alpes). Capacité: 1500 à 4 500 éq. hab. Traitement des ERU par flottation et biofiltration sous pression avec utilisation d'oxygène pur (OXYAZUR).



1 – *Relèvement par pompes submersibles.*
2 – *Prétraitement :*
- *dégrillage mécanique,*
- *dessablage aéré,*
- *dégraissage,*
- *tamisage.*

3 – *Décantation primaire, lamellaire avec épaississement (DENSADEG).*
4 – *Traitement biologique par cultures fixées (BIOFOR).*
5 – *Citerne d'eau de lavage.*
6 – *Citerne de reprise d'eau boueuse de lavage.*
7 – *Recirculation d'eau boueuse de lavage.*
8 – *Pompage de boues fraîches vers déshydratation.*
9 – *Déshydratation mécanique par filtre à bandes SUPERPRESS avec dosage de polymère et floculateur associés.*
10 – *Recirculation de filtrat et d'eau de lavage des toiles.*

Figure 876. Schéma de la station de GRÉOUX-LES-BAINS (Alpes-de-Haute-Provence).

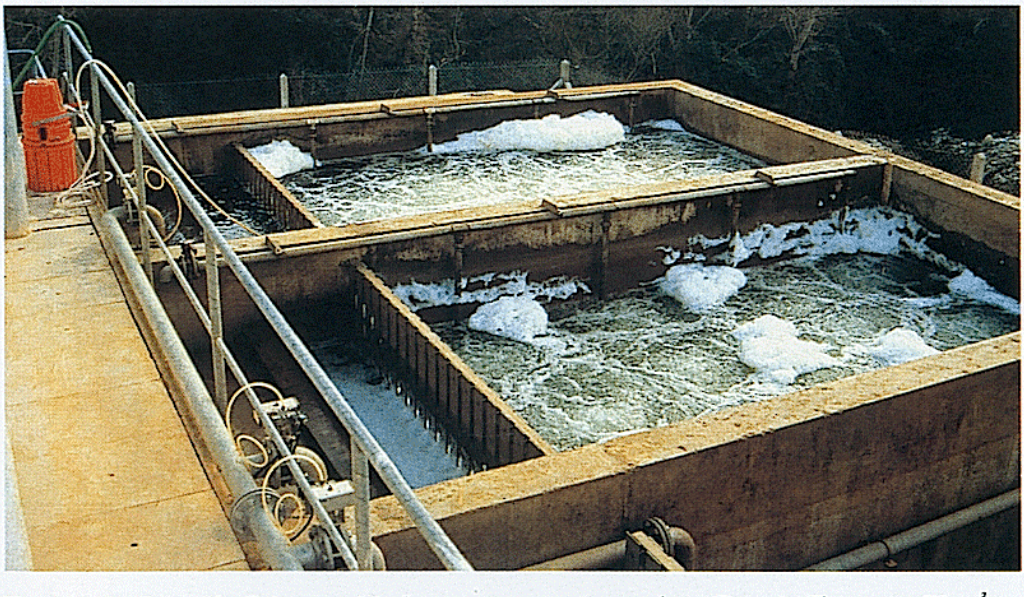
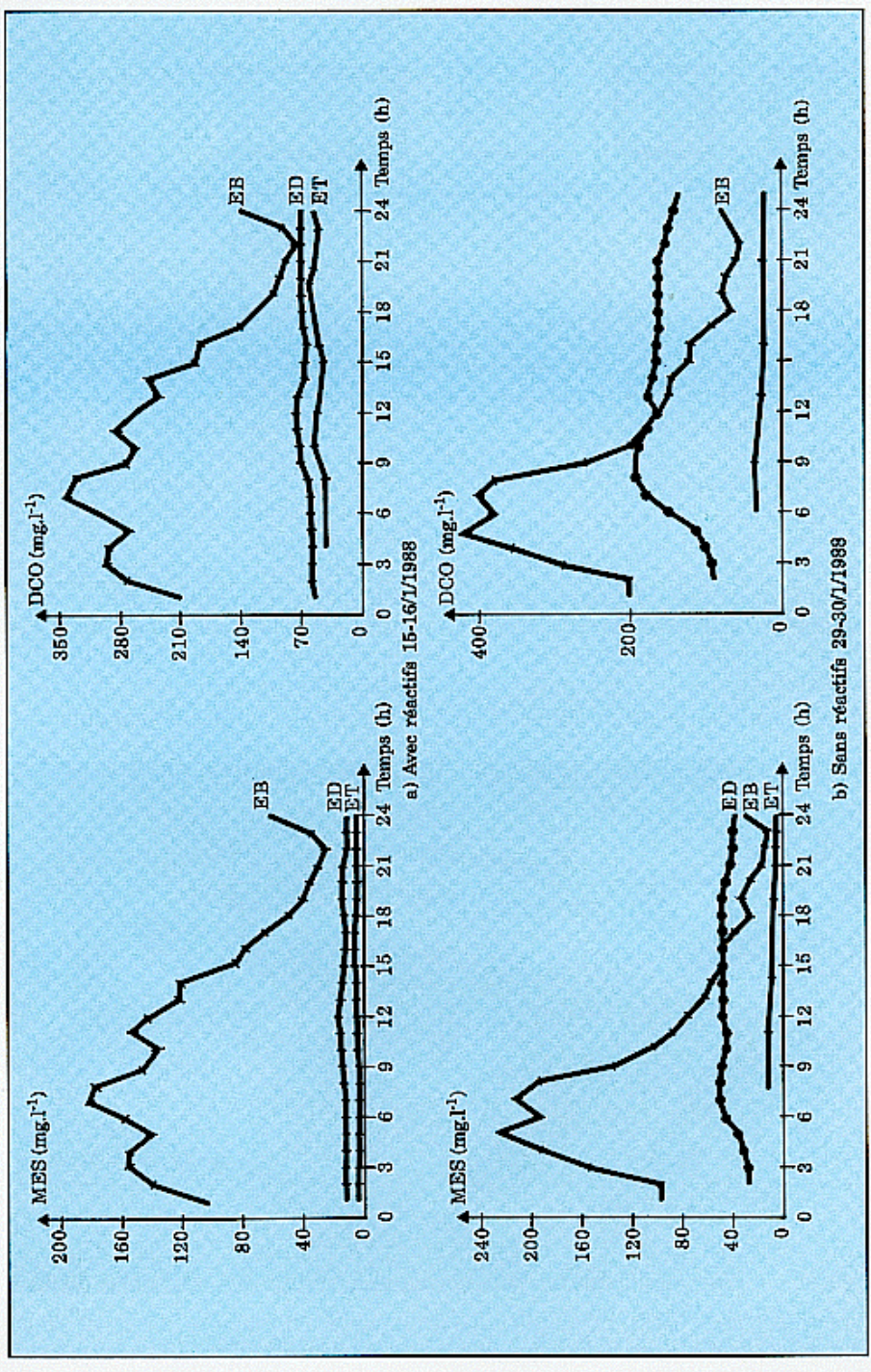


Figure 877. Gréoux-les-Bains municipal wastewater treatment plant (France). Flow rate: 75 m^3 to 400 $m^3.h^{-1}$. Treatment by biological filtration. View of Biofor filters.

Figure 877. Installation de GRËOUX-LES-BAlNS (Alpes-de-Haute-Provence). Débit: de 75 à 400 m3. Traitement des ERU par biofiltration. Vue sur les filtres BIOFOR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



EB = eau brute ; ED = eau sortie DENSADEG ; ET = eau traitée.
Figure 878. Station de GREOUX-LES-BAINS – Résultats de fonctionnement.
a) Avec réactifs ($FeCl_3$ 40 $g.m^{-3}$ – polymère : 0,5 $g.m^{-3}$). b) Sans réactifs.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. CHAINES DE TRAITEMENTS TERTIAIRES

GÉNÉRALITÉS

Les traitements tertiaires ont pour but d'améliorer les caractéristiques d'une eau résiduaire après un traitement biologique.

Selon le niveau du rejet final recherché, ou la réutilisation envisagée (voir page81), la gamme des traitements mis enjeu est plus ou moins étendue.

On peut ainsi définir :

- l'affinage, qui tend à réduire encore la teneur en MES ainsi que celle en DBO_5,
- la déphosphatation chimique, seule ou associée à une déphosphatation biologique,
- la nitrification, avec ou sans dénitrification, si elle n'a pas été réalisée dans les étapes précédentes,
- l'élimination de la DCO non biodégradable et des toxiques organiques ou minéraux,
- l'élimination de la couleur et des détergents,
- - la décontamination, élimination des germes pathogènes et des parasites.

3.1. LES TECHNIQUES D'AFFINAGE

Avec les ERU, ces techniques sont surtout physiques et biologiques. Le choix de l'une d'entre elles dépend de la qualité de l'eau à traiter, de l'objectif final désiré et de la place disponible.

Les performances des traitements d'affinage les plus courants sont présentés dans le tableau ci-après:

Effluents à affiner		Objectif désiré		Technique
DBO_5 $mg.l^{-1}$	MES $mg.l^{-1}$	DBO_5 $mg.l^{-1}$	MES $mg.l^{-1}$	
40	30	20	-	Lagunage
40	30	30	15	Filtration
80	40	30	30	Filtration biologique type BIOFOR ou BIODROF
30	30	10	10	Filtration biologique
-	50 - 200	-	30	Floculation - Clarification

3.1.1. Lagune de finition

Une technique biologique répandue est celle de la lagune de finition (voir page 324). Les teneurs en MES et en DBO_5 étant faibles, les dépôts sont limités et les curages peu fréquents. Un séjour de 48 h en lagune, à 15 °C, ramène la teneur en DBO_5 de l'eau de 40 à 20$mg.l^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'intérêt principal des lagunes de finition réside dans la décontamination bactérienne dont le rendement est soumis au rythme des saisons. Un séjour de 30 jours à 15 °C permet d'abattre la teneur en germes test d'un effluent urbain épuré de 106 par 100 ml. (voir page 177) à 103 environ.

3.1.2. Filtration

Le procédé d'affinage le plus répandu est la **filtration** simple appelée souvent

tertiaire

C'est un procédé principalement physique qui permet d'éliminer 50 à 80 % des MES et 3 0 à 40 % de la pollution organique carbonée d'un effluent urbain ayant subi un traitement secondaire.

Les sables utilisés ont une TE comprise entre 0,95 et 2 mm. Au-dessous de ces valeurs, les cycles de filtration sont trop courts, et au-dessus, les rendements d'épuration trop faibles. La hauteur du matériau varie entre 1 et 1,5 m. Le rendement d'épuration d'un filtre est affecté par la vitesse de filtration qui peut varier, selon la hauteur de couche, entre 5 et 30 $m.h^{-1}$; il a tendance à décroître rapidement au-delà de 20 $m.h^{-1}$.

La **floculation sur filtre** est parfois adoptée en particulier dans le cas de déphosphatation chimique poussée (voir page 1296).

3.1.3. Filtration biologique

Un apport d'oxygène améliore le rendement d'élimination de la DBO_5 par le développement bactérien qui se produit dans le filtre.

Avec un matériau poreux tel que la BIOLITE, qui retient, même après lavage, une masse bactérienne suffisante, cette filtration tertiaire devient alors une véritable filtration biologique par cultures fixées

le taux d'élimination des MES varie de 5 0 à 80 % et dépend en particulier des caractéristiques du matériau support. L'élimination de la DBO_5 est généralement comprise entre 40 et 60 %.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Installation de BEX (Suisse). Traitement des ERU avec filtration tertiaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 879. Installation de MANNHEIM (RFA). Débit temps sec: 14 000 $m^3.h^{-1}$. Traitement des ERU par filtration biologique sur 32 BIODROF

En fonction de l'effluent à affiner et de l'objectif à atteindre, le filtre biologique peut être:

- sec, à flux descendant, type BIODROF : par exemple pour un effluent en provenance d'un traitement biologique surchargé,
- immergé, à flux descendant, type OXYAZUR,
- immergé, à flux ascendant, type BIOFOR, en particulier si on recherche un rendement important d'élimination de la pollution organique et/ou une nitrification.

3.1.4. Floculation - Clarification

La floculation - clarification après épuration biologique est le plus souvent mise en œuvre sur des effluents industriels mais elle peut l'être aussi sur des effluents urbains, en particulier dans les cas de chaînes de recyclage élaborées (filtration fine, charbon actif).

La floculation - clarification joue aussi le rôle de barrière de sécurité face à des rejets intempestifs de MES (par exemple, entraînement du voile de boue des décanteurs secondaires).

Si la filtration, avec ou sans floculant, peut être envisagée pour des effluents contenant moins de 60 $mg.l^{-1}$ de MES, il faut procéder à une floculation suivie d'une clarification ou d'une flottation pour des effluents plus concentrés. Dans la plupart des cas, des essais pilotes permettent (acquisition des meilleurs paramètres techniques.

La flottation est applicable à des vitesses comprises entre 3 et 6 $m.h^{-1}$ en permettant la production de boues très concentrées.

La décantation conventionnelle, souvent utilisée, est dimensionnée pour des vitesses très inférieures, mais la mise en œuvre de décanteurs lamellaires permet de réduire (encombrement des ouvrages.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.2. DÉPHOSPHATATION

La déphosphatation est faible dans les stations qui ne sont pas conçues pour l'élimination biologique du phosphore; même dans ce dernier cas, les caractéristiques de l'eau brute peuvent ne pas permettre une déphosphatation suffisante. La solution est alors une élimination chimique des phosphates au moyen de réactifs qui donnent naissance à des précipités ou des complexes insolubles.

Les principaux réactifs industriels utilisés sont les sels d'aluminium, les sels de fer et la chaux.

Avec le sulfate d'aluminium ou le chlorure ferrique, la principale réaction est la suivante:

$$M^{3+} + PO_4^{3-} \longrightarrow \underset{\downarrow}{MPO_4}$$

D'autres réactions annexes se produisent, en particulier avec les bicarbonates de l'eau

$$M^{3+} + 3\,HCO^{3-} \qquad M(OH)_3 + 3\,CO_2$$

Ces réactions annexes réduisent l'alcalinité de l'eau et entraînent une baisse de pH dépendant du pouvoir tampon. De plus, elles contribuent à une consommation supplémentaire de réactifs. Généralement, pour obtenir moins de 1 $mg.l^{-1}$ en P, le rapport molaire M/P varie entre 1,5 et 2.

L'aluminium peut également être introduit sous forme d'aluminate. La principale réaction, avec l'aluminate de sodium, est la suivante

$$Na_2O, A1_20_3 + 2\,PO_4^{3-} + 4\,H_2O$$
$$\rightarrow 2\,Al\,PO_4 + 2\,NaOH + 6\,OH^-$$

Dans ce cas également, des réactions annexes peuvent se produire, surtout avec les bicarbonates et les molécules d'eau, elles-mêmes donnant lieu à la formation de $Al(OH)_3$. Contrairement à l'utilisation de sulfate d'aluminium ou de chlorure ferrique, le pH a tendance à augmenter.

Les mécanismes de précipitation à la chaux sont quelque peu différents de ceux précédemment décrits (voir page 153). La solubilité de l'apatite est très dépendante du pH. A pH supérieur à 9, la chaux réagit avec les bicarbonates pour donner des précipités de calcite. Un nouvel accroissement de pH est alors nécessaire si une faible teneur en phosphore est demandée. Cela induit une précipitation de $Mg(OH)_2$ qui consomme à son tour du réactif. La principale conséquence de cet apport de chaux est, bien entendu, une augmentation du pH qu'il est nécessaire de neutraliser après séparation. La déphosphatation à la chaux s'accorde très bien avec l'élimination de l'azote par strippage à l'air.

Deux techniques sont possibles: **la précipitation simultanée** par introduction d'un sel de fer ou d'aluminium dans les BA, et la **précipitation séparée,** qui constitue alors un véritable troisième stade d'épuration.

Le rendement d'élimination d'une précipitation simultanée est de 80 à 90 %. Les boues activées sont alourdies, leur indice de MOHLMAN baisse; la méthanisation des boues n'est pas perturbée par la présence des sels métalliques.

La précipitation séparée nécessite des quantités importantes d'adjuvant de floculation pour obtenir une clarification correcte. (Décantation lamellaire ou flottation).

Le plus souvent, une telle précipitation séparée suit la précipitation simultanée à titre de finition, la séparation est alors effectuée sur filtre et la teneur de l'effluent en phosphore devient inférieure ou égale à 0,2 $mg.l^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3. TRAITEMENT TERTIAIRE DE L'AZOTE

Si l'azote ne peut être traité lors de l'étape secondaire dite biologique, il est possible de le transformer dans une troisième étape de nitrification par boues activées, ou, mieux, par filtration biologique suivie éventuellement d'une autre étape de dénitrification.

Une élimination physico-chimique de l'azote peut être également envisagée en portant le pH à une valeur minimale de 11 par addition de chaux afin de déplacer les ions $NH4^+$ et d'éliminer l'ammoniac par strippage à l'air. Ce procédé, qui peut être couplé avec la déphosphatation, est cependant peu utilisé car il est coûteux en investissement et en énergie; de plus il est sensible à la température et aux précipitations.

Diverses tentatives d'utiliser les techniques d'échange d'ions sur résine ou sur zéolithe naturelle (clinoptinolite), n'ont pas conduit à des réalisations industrielles notables.

3.4. ÉLIMINATION DE LA POLLUTION NON BIODÉGRADABLE

Cette élimination complémentaire peut être nécessaire dans le cas où un recyclage à usage noble est envisagé, ou sur certains effluents à forte pollution industrielle avec DCO très élevée ou coloration intense; l'adsorption sur charbon actif est alors mise en oeuvre

Le charbon actif peut être ajouté en poudre aux boues activées (voir page 1284). Il peut être aussi utilisé en grains dans une filtration; il y a alors intérêt à éliminer au préalable la quasi totalité de la pollution biodégradable pour éviter une prolifération bactérienne au sein du lit de charbon actif.

La capacité de fixation du charbon actif varie, suivant la nature des pollutions, entre 200 et 400 g de DCO par kg de charbon actif. La régénération du charbon actif peut se faire par voie thermique ou chimique.

Dans le cas où la chaîne de traitement comporte en aval un passage sur membrane, une décontamination bactérienne doit être prévue après la filtration sur charbon actif.

3.5. DÉSINFECTION (partielle)

Une décontamination microbiologique des eaux usées traitées est parfois mise en œuvre ; les réglementations en la matière différent largement de pays à pays. L'effet recherché est un abattement significatif des germes indicateurs: objectifs par exemple de 100 ou de 1000 coliformes totaux/100 ml.

Si l'abattement de coliformes est significatif de l'élimination de Salmonella ou de Shigella, il n'en est pas de même pour les virus, en particulier celui de l'hépatite.

La désinfection est recommandée quand on veut réutiliser les eaux résiduaires traitées pour l'arrosage au

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

moyen de dispositifs qui créent des aérosols. Lorsqu'une inactivation totale est souhaitée sur des rejets contenant des germes infectieux en grande quantité, seule la montée en température permet d'atteindre l'objectif.

Un moyen efficace de désinfection est le lagunage de finition qui nécessite toutefois de grandes surfaces et est sensible à la température (voir page 1293).

La **désinfection chimique** (voir page 252) la plus fréquente est la désinfection **par le chlore,** qui nécessite, pour être efficace, le maintien d'une teneur résiduelle suffisante, un temps de contact minimal de 20 min. dans une chambre de contact équipée d'un système de chicanes assurant un écoulement en flux piston. Si l'on veut obtenir une réduction du nombre de coliformes supérieure à 99,9 %, les doses à appliquer sont comprises dans les gammes suivantes

- après traitement physico-chimique 3 à 10 $mg.l^{-1}$,
- après épuration biologique par BA: 2 à 10 $mg.l^{-1}$,
- après épuration biologique et filtration sur sable: 2 à 5 $mg.l^{-1}$.

L'effet désinfectant du chlore est d'autant plus net que le niveau de l'épuration qui précède son injection est élevé. En particulier, l'élimination des MES doit être très poussée. La présence de NH_4^+ réduit l'effet bactéricide du chlore par formation de chloramines peu actives. Une nitrification-dénitrification poussée est donc favorable à la désinfection par le chlore. Cet inconvénient ne se retrouve pas intégralement si on utilise le dioxyde de chlore.

Figure 880. Installation de TAIE (Arabie Saoudite). Débit: 67000 $m^3.j^{-1}$ Vue générale.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Pour éviter la formation de composés organochlorés susceptibles d'être toxiques pour la faune et la flore du milieu récepteur, on peut envisager l'utilisation du brome, ou, mieux, celle des rayons W. Cette dernière technique, qui a l'avantage de ne comporter aucun ajout de réactif dans de l'eau, est cependant coûteuse, en particulier du fait de la multiplicité de modules de faible capacité (puissance unitaire des lampes). Son contrôle est, par là-même aussi, difficile.

Une déchloration après chloration permet de limiter considérablement l'effet toxique des sous-produits, le gaz SO_2 est le plus adapté à ce traitement final. La dose de SO_2 utilisé est de l'ordre de 1 g par g de Cl_2 résiduel (combiné). Un excès de SO_2 conduit à une baisse du pH du rejet

Quant à l'ozone, c'est à la fois un agent désinfectant actif, tout particulièrement sur les virus, et un oxydant de la matière organique; son emploi est particulièrement adapté aux stations d'épuration biologique utilisant l'oxygène pur (du fait de la réutilisation dans le réacteur biologique du gaz vecteur sortant de la tour d'ozonation). Il doit, par ailleurs, être utilisé dans les chaînes de réutilisation d'eaux usées à des fins de potabilisation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. CHAÎNES DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS ET PERFORMANCES

4.1. SYNOPSIS DES CHAÎNES DE TRAITEMENT

L'épuration d'un effluent urbain peut mettre en jeu séparément ou conjointement:

- des ouvrages d'épuration physique
- prétraitement (dégrillage - tamisage, dessablage - dégraissage),
- décantation primaire pour l'élimination des MES décantables,
- des ouvrages d'épuration physico-chimique permettant, par coagulation, de retenir les MES colloïdales en plus des MES décantables,
- des ouvrages d'épuration biologique assurant une élimination plus ou moins complète des pollutions carbonée ou azotée. Deux étages de traitement biologique peuvent parfois se succéder sur une même installation,
- des ouvrages de traitement tertiaire.

Une station d'épuration ne peut fonctionner efficacement que si elle comprend une chaîne de traitement des boues bien adaptée permettant une évacuation régulière de celles-ci (cf. sous-chapitre 5).

Les chaînes de traitement d'eau et de traitement des boues sont d'ailleurs interdépendantes, en particulier par le retour, en tête de station, des liqueurs en provenance du traitement des boues.

Performance des différents traitements et chaînes de traitement

Le tableau 86 donne les performances moyennes que l'on peut normalement prévoir dans les conditions de dimensionnement habituelles, avec une ERU contenant au maximum 30 % d'effluents industriels non toxiques et présentant les caractéristiques moyennes suivantes

MES 250 $g.m^{-3}$	NTK 50 $g.m^{-3}$
DBO5 250 $g.m^{-3}$	P 10 $g.m^{-3}$
DCO 500 $g.m^{-3}$	ST 1200 $g.m^{-3}$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 86. Performances des chaînes de traitement ERU.

N°	Filière	MES		DBO5		DCO		NU		p	
		Rendement	Concentr. $mg.l^{-1}$	Rendement %	Concentr. $mg.l^{-1}$	Rendement %	Concentr. $mg.l^{-1}$	Rendement %	Concentr. $mg.l^{-1}$	Rendement %	Concentr. $mg.l^{-1}$
1	Décantation primaire	40-60	-	20-35	-	20-35	-	5-10	-	n.s.	-
2	Traitement physico-chimique	80-95	20	40-65	100	40-65	150	10-15	50	80-90	1
3	BA - moyenne charge	90	30	90-95	30	80	90	15	50	n.s.	-
4	Aération prolongée	90	30	95-98	20	80	90	90 (1)	5	n.s. (2)	-
5	Décantation primaire et BA à moyenne charge	90	30	90-95	30	80	90	15	50	n.s. (3)	-
6	Décantation primaire et BA à fable charge pour nitrification	90	30	95	20	80	90	90 (1)	5	n.s. (2)	-
7	Décantation primaire et lit bactérien	85	45	80	60	75	120	10-15	55	n.s.	-
8	Traitement physico-chimique et lit granulaire pour pollution carbonée	95	15	90	30	80	90	15	50	80-90	1
9	Traitement physico-chimique et lit granulaire pour pollution carbonée et azotée	95	10	95	10	90	50	85	10	80-90	1
10	Décantation primaire, BA à moyenne charge et filtration sur sable	95	10	95	10	90	50	15	50	n.s. (3)	-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 86. Performances des chaînes de traitement ERU (suite).

N°	Filière	MES		DBO5		DCO		NTK		P	
		Rendement %	Concentr. $mg.l^{-1}$	Rendement %	Concentr. $mg.l^{-1}$	Rendement %	Concentr. $mg.l^{-1}$	Rendement %	Concentr. $mg.l^{-1}$	Rendement %	Concentr. $mg.l^{-1}$
11	Décantation primaire, BA à moyenne charge et lit granulaire pour pollution azotée	95	10	95	10	90	50	90	5	n.s. (3)	-
12	Décantation primaire, BA à faible charge avec déphosphatation simultanée et filtration	95	< 5	95	< 5	90	50	90	5	95	1 (4)
13	Décantation primaire, BA à faible charge, floculation-clarification, filtration										
	sur sable, CAG et chloration		=1		=1		10	95	5	95	1
14	Décantation primaire, BA à faible charge, floculation-clarification, filtration sur sable, CAG, chloration et membrane (5)		< 1		< 1		< 10	99	< 0,5	95	< 0,1

n.s.: non significatif. N.B. 1- Sur des eaux peu concentrées, les rendements d'élimination atteints sont inférieurs à ceux indiqués
(1) 70 % de N global si dénitrification. dans ce tableau du fait de la pollution résiduelle liée aux matières non séparables ou très difficilement
(2) 75 % de P total si déphosphatation simultanée. dégradables.
(3) 80 % de P total si déphosphatation simultanée. N.B. 2 - En ce qui concerne le pouvoir désinfectant des diverses chaînes,
il est à noter que, si la rétention des
(4) 0,2 mg.l-1 si floculation sur filtre avec adjuvant. oeufs parasites est efficace, voire totale, le pouvoir d'arrêt des
bactéries reste très faible.
(5) ST: 100 à 200 gin - 3.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2. QUELQUES EXEMPLES DE CHAÎNES COMPLÈTES

4.2.1. Commune de Bex (Suisse)

Cette station assure une déphosphatation poussée de l'effluent qui est rejeté dans le Rhône en amont du lac Léman (figure 881).

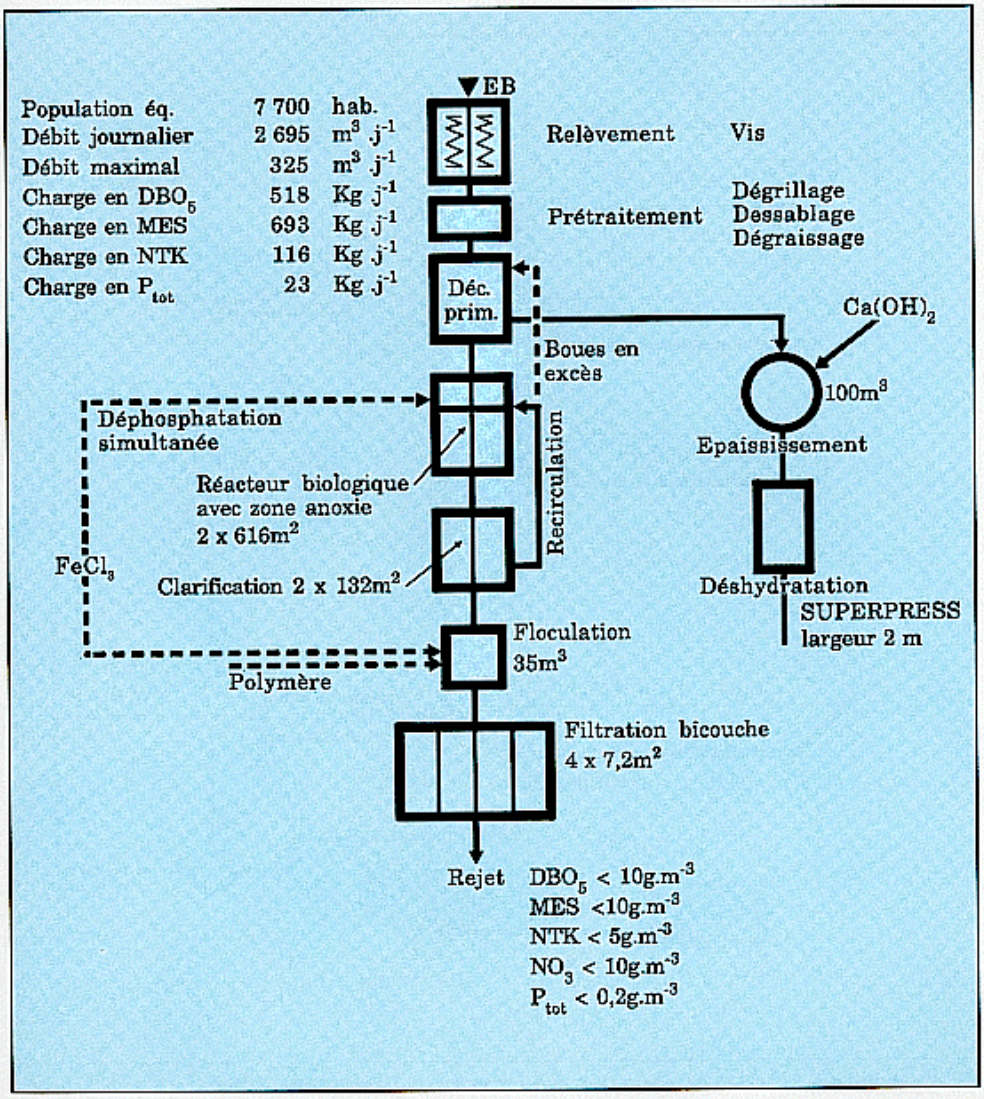


Figure 881. Commune de BEX (Suisse). Schéma de fonctionnement de la station d'épuration.

Figure 881. Commune de BEX (Suisse). Schéma de fonctionnement de la station d'épuration.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2.2. Commune de SEIGNOSSE-LE-PENON (Landes)

Cette station dessert une agglomération traité est infiltré directement dans le sol à population très variable dont l'effluent d'une zone dunaire (figure 882).

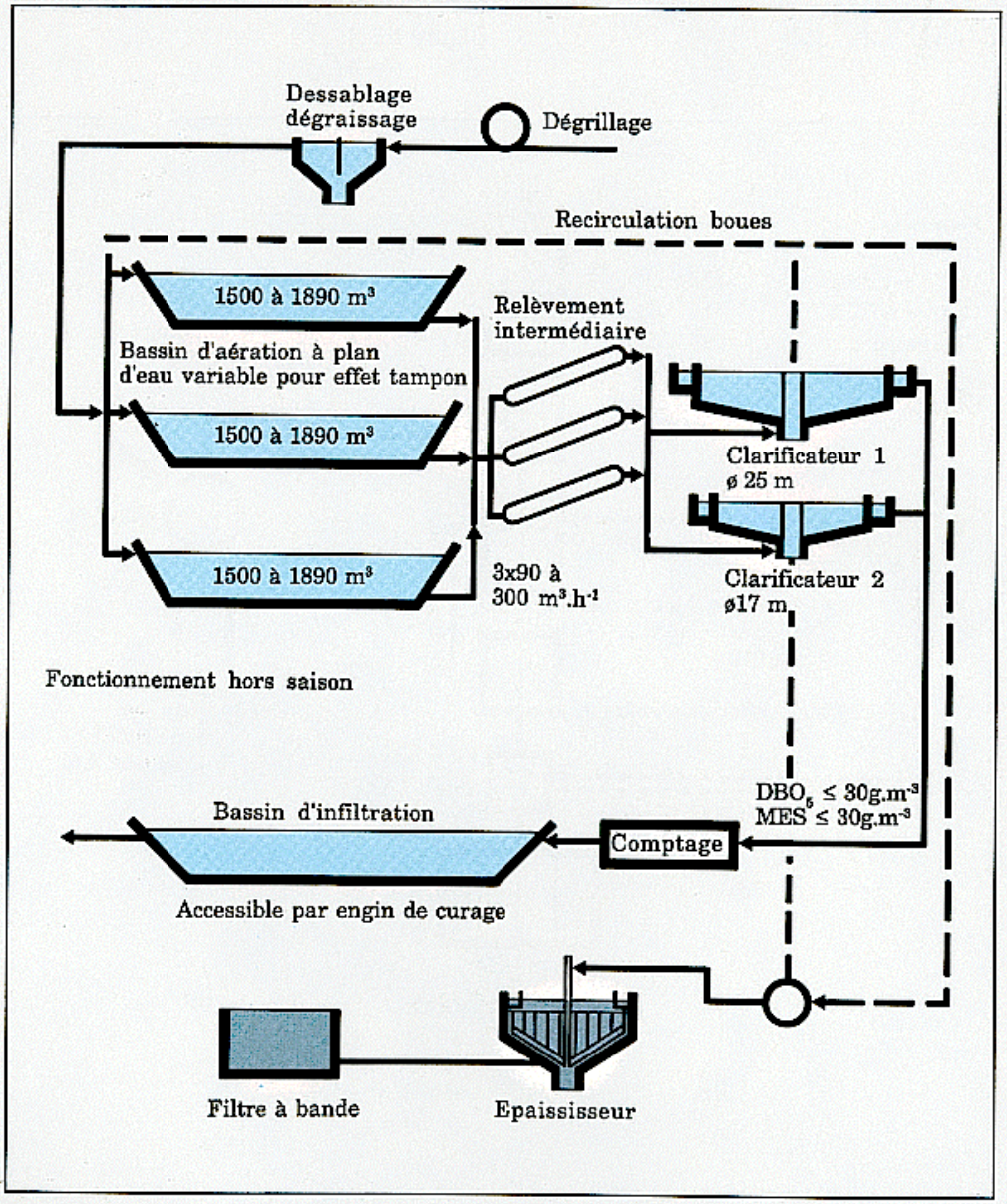


Figure 882. Commune de SEIGNOSSE-LE-PENON (France). Schéma de fonctionnement de la station d'épuration.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 883. Commune de ZERMATT Construction souterraine. Distribution générale des ouvrages en galeries dans la roche.

Population équivalente: 5 000 à 22 000 éq. hab.
Débit maximal : 800 m^3l^{-1}
Charge maximale en DBO_5 : 2 350 $kg.j^{-1}$
Charge maximale en MES : 2 400 $kg.j^{-1}$
Qualité de l'effluent DBO_5 : ≤20 $mg.l^{-1}$
MES : ≤20 $mg.l^{-1}$
Ptot : ≤1 $mg.l^{-1}$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4.2.3. Installation de MARAVEN Région de CARDON (Venezuela)

Cette installation traite un effluent urbain afin de la rendre apte à son utilisation dans une raffinerie de pétrole pour les besoins de lavage et refroidissement (figure 884). Une étude sur pilote (figure 885) a démontré la faisabilité d'un traitement complémentaire pour l'alimentation de chaudière HP (100 bars).

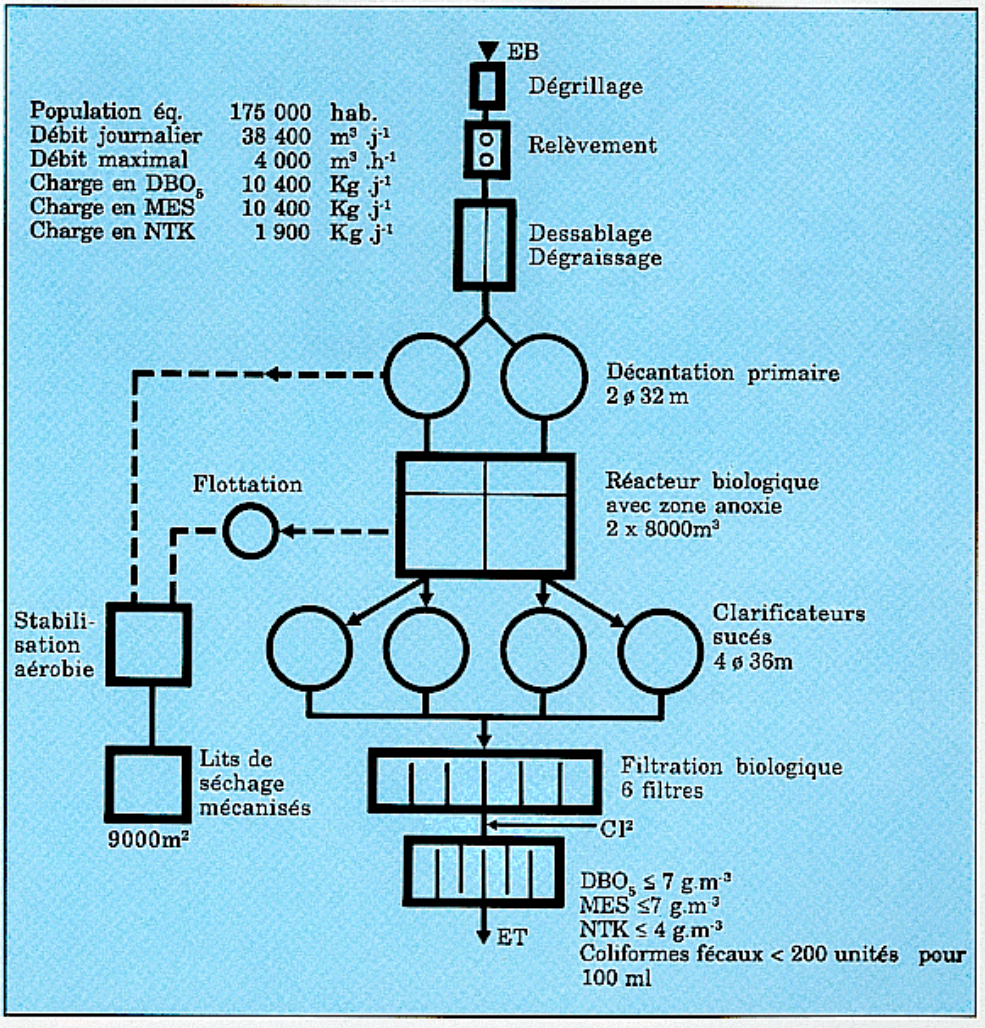


Figure 884. Installation de MARAVEN (Venezuela). Schéma de fonctionnement de la station principale.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

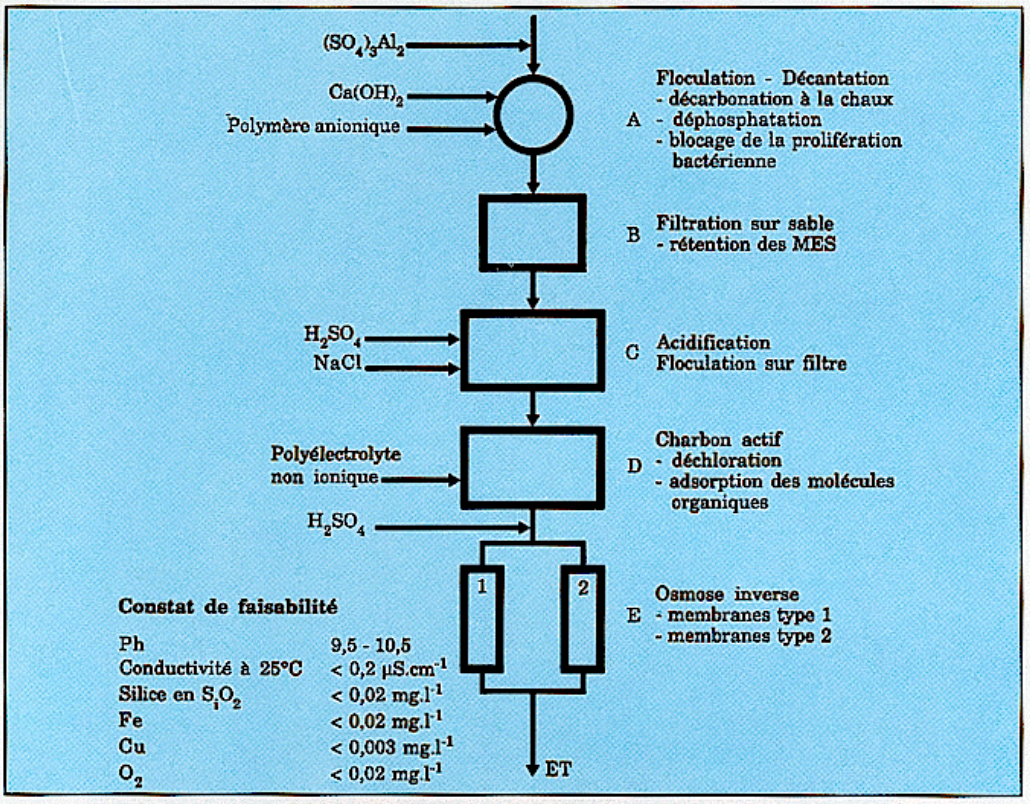


Figure 885. Installation de MARAVEN (Venezuela). Schéma de fonctionnement de la station pilote.

4.2.4. Ville de TAIE (Arabie Saoudite)

Cette usine, très complète, traite les eaux usées, ainsi que des matières de vidange de la ville de TAÏF, capitale d'été du royaume d'Arabie Saoudite.

L'effluent final est réutilisé dans un réseau fournissant à la ville de TAÏF l'eau destinée à l'arrosage, au nettoyage, au refroidissement, et à d'autres installations industrielles. L'ingestion occasionnelle par l'homme a été prise en compte. Deux filières de traitement, parallèles, ont été mises en service, entre le stade d'épuration biologique (avec élimination de l'azote), et la filtration sur CAG (figure 886).

Les résultats moyens d'exploitation sont donnés par le tableau 87.

Tableau 87. Ville de TAÏF. Quelques résultats d'exploitation (mars 1988-février 1989). 12 652 $m^3.j^{-1}$ environ 50 % de charge nominale en flux polluant.

	MES $g.m^{-3}$	DBO5 $g.m^{-3}$	DCO $g.m^{-3}$	NU $g.m^{-3}$	N03 $g.m^{-3}$	Ntot $g.m^{-3}$	NH, $g.m^{-3}$	Turbidité NTU
Eaux brutes	315	294	630	65	5	70	55	
Sortie du traitement biologique	3,1	15	32	3,9	5,8	9,7	3,1	
Sortie de filtration (multicouche)	1	5,3	12,1					0,8
Sortie du charbon actif	0,25	0,51	1,9	1,5	8	9,5	0,5	0,45

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

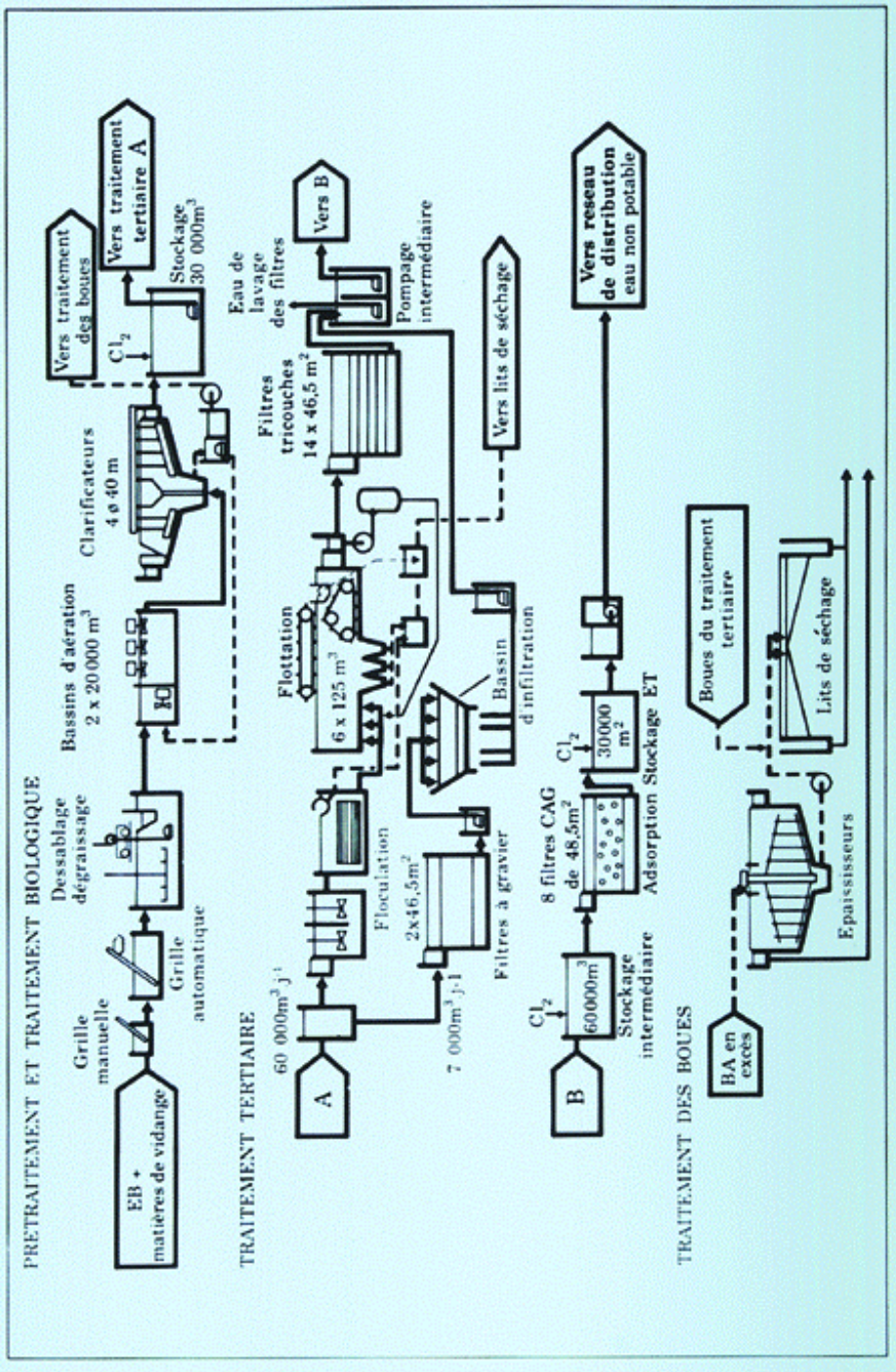


Figure 886. Usine de traitement et de récupération des eaux usées de la ville de TAÏF (Arabie Saoudite). Capacité 67 000 $m^3 j^{-1}$. Schéma de fonctionement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. TRAITEMENT DES BOUES

5.1. PRINCIPALES FILIÈRES DE TRAITEMENT DES BOUES

Le choix d'une filière de traitement des boues est fondamental car il engage la continuité et la qualité du traitement des eaux. Une station d'épuration d'ERU produit environ 2 litres de boue liquide par équivalent habitant et par jour.

Ce choix est difficile car il dépend:

- du type de traitement d'eau et de la nature de l'effluent,
- de l'importance de l'installation, - des possibilités financières,
- de la destination ultime des boues et, donc, de la forme sous laquelle se présente le produit final.

Le tableau 88 présente les différentes chaînes de traitement de boues, en résumant leurs caractéristiques principales.

5.2. PRINCIPES DE MISE EN OEUVRE

L'obtention d'un produit final dont la qualité correspond à la (ou les) destinations) préalablement définie(s) s'effectue par une succession plus ou moins complexe de procédés qu'il y a lieu de relier entre eux de façon optimale.

Sont à considérer principalement - les conditions de stockage,

- les fluctuations des performances des différents maillons de la chaîne.

Stocker des boues fraîches et liquides est fortement déconseillé: la fermentation conduit à la baisse de la filtrabilité de la boue et les risques d'odeurs ne peuvent que croître; il y a donc lieu "d'enchaîner" les traitements de boues fraîches aussi rapidement que possible. Les épaississeurs sont à considérer comme tels et non comme des stockeurs de boues épaissies.

Les boues doivent être déshydratées au **plus** vite, à moins qu'une digestion anaérobie ne soit prévue.

Si le bilan d'exploitation peut être effectué sur des caractéristiques moyennes, il est indispensable d'examiner le comportement de la filière avec des valeurs plus défavorables: c'est bien dans ces conditions qu'est appréciée la fiabilité de la chaîne de traitement retenue.

Le concepteur doit toujours avoir à l'esprit que les boues urbaines ne sont ni des produits homogènes ni des produits stables.

. **Tuyauteries**

Le tracé des tuyauteries doit être le plus rectiligne possible; les écoulements gravitaires sous faible charge hydraulique sont à éviter; si tel est le cas, des possibilités de curage ou de chasse doivent être envisagées, surtout pour les boues fraîches. Les pertes de charge doivent être calculées largement (en appliquant les règles rhéologiques pour produits non newtoniens dans les cas difficiles).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 88. Principales filières de traitement des boues.

Type de boues, chaîne de traitement et siccité gâteau	Avantages	Inconvénients	Destination possible	Gamme d'utilisation européenne (nombre d'habitants)
BOUES FRAÎCHES	Limitation des investissements.	Risque d'odeurs très important.		
Boues fraîches et déshydratation par filtre à bandes ou centrifugeuse. MS = 20-25 %.	Investissement modéré. Faible encombrement.	Produit très fermentescible. Nécessité d'un pré et post-chaulage. Solution "courte". Quantité importante de boues. Coût de décharge élevé.	Décharge si siccité acceptée.	20 000 à 50 000
Boues fraîches et	Investissement moyen.	Coût de réactifs élevé.	Décharge. Incinération	> 50 000
déshydratation par filtre-presse. MS = 35-40 %.	Bonne siccité du gâteau.	Surveillance importante. Coût de séchage non négligeable.	possible après séchage complémentaire.	
Boues fraîches et déshydratation par filtre à bandes ou centri-fugeuse et compostage. MS = 30-40 %.	Produit revalorisable.	Investissement important à amortir par la vente du produit. Réseau de vente indispensable.	Terreau commercia-lisable. Revalorisation agricole par épandeur à fumier. Décharge.	> 100 000
Boues fraîches et déshydratation par filtre à bandes ou centri-	Production d'un produit très sec ou de cendres. Intéressant si source	Investissement très important. Dépense d'énergie importante.	Revalorisation agricole. Terreau. Décharge. Incinération.	> 100 000
fugeuse + séchage ou incinération. MS = 80-90 % (ou cendres).	d'énergie disponible.			

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Boues fraîches + conditionnement thermique + filtre presse + incinération (cendres).	Consommation minimale de matières consommables puisque récupération d'énergie sur l'incinération.	Investissement très important Risque d'odeur élevé. Traitement spécial des jus.	Incinération spécifique.	> 300 000
BOUES STABILISÉES (AÉROBIES)	Simplicité.	Mauvaise filtrabilité des boues. Risque d'odeurs.		
Boues stabilisées et lits de séchage. MS = 30 %.	Investissement le plus faible. Rusticité.	Grande surface. Réduction limitée des matières organiques. Main-d'ceuvre importante pour reprise des boues séchées. Influence des conditions météo.	Revalorisation agricole produit liquide ou terreux. Décharge.	> 10 000
Boues stabilisées liquides. MS = 2-5 %.	Investissement très faible. Rusticité.	Stockage très important. Frais d'épandage élevés.	Revalorisation agricole produit liquide.	< 5 000
Boues stabilisées et égouttage. MS = 5-10 %.	Investissement modéré. Simplicité. Stockage modéré.	Frais de réactifs, toutefois compensés par la diminution des coûts d'épandage.	Revalorisation agricole. Produit visqueux mais pompable.	< 15 000
Boues stabilisées et déshydratation après conditionnement aux polymères par filtre à bandes ou centrifugeuse. MS = 15-20 %.	Investissement modéré. Compacité de l'installation, Surveillance aisée.	Frais de réactifs, produit pâteux pas toujours admis en décharge.	Revalorisation agricole possible avec épandeur à plateau centrifuge. Mise en décharge problématique.	10 à 100 000
Boues stabilisées et filtre-presse après conditionnement minéral. MS = 30-35 %.	Siccité importante du gâteau.	Frais de réactifs élevés. Surveillance importante. Investissement assez lourd.	Revalorisation agricole possible avec épandeur à fumier. Mise en décharge possible.	30 à 100 000 -

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 88. Principales filières de traitement des boues (suite).

Type de boues, chaîne de traitement et siccité gâteau	Avantages	Inconvénients	Destination possible	Gamme d'utilisation européenne (nombre d'habitants)
Boues stabilisées + déshydratation par filtre à bandes ou centrifugeuse + compostage. MS = 30-40 %.	Production d'un compost revalorisable.	Produit deux fois stabilisé. Investissement lourd à amortir par la vente du produit. Réseau de vente indispensable.	Terreau commercialisable. Revalorisation agricole possible par épandeur à fumier. Décharge.	> 100 000
BOUES DIGÉRÉES (ANAÉROBIES)	Réelle stabilisation des boues et diminution du poids de boues. Stockage possible sans risque.	Investissement alourdi, à comparer aux économies faites par réduction des MS à traiter et diminution consommation énergétique.		
Boues digérées + lits de séchage. MS = 30 %.	Investissement modéré. Coût d'exploitation modéré.	Immobilisation de terrain importante. Main-d'oeuvre pour reprise des boues séchées. Influence des conditions météo.	Revalorisation agricole de produit liquide ou terreux. Décharge.	
Boues digérées liquides. MS = 2-3 %.	Investissement modéré. Coût d'exploitation modéré.	Stockage important. Frais d'épandage élevés.	Revalorisation agricole de produit liquide.	
Boues digérées + égouttage. MS =5-10 %.	Investissement modéré.	Frais d'épandage réduits compensant les frais de réactifs.	Revalorisation agricole de produit visqueux mais pompable.	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Boues digérées et déshydratation, après conditionnement au polymère, par filtre à bandes ou centrifugeuse. MS = 20-25 %.	Investissement modéré.	Frais de réactifs. Produit pâteux pas toujours admis en agriculture.	Revalorisation agricole possible avec épandeur à plateau centrifuge.	40 000 à 100 000
Boues digérées + filtre-presse et conditionnement minéral. MS = 35-40 %.	Gâteau de bonne siccité, ne nécessitant pas trop de réactifs.	Investissement important Frais de réactifs non négligeables. Surveillance importante.	Revalorisation agricole de produit terreux. Décharge.	50 000 à 300 000
Boues digérées + conditionnement thermique + filtre-presse. MS = 50 %.	Gâteau de très bonne siccité. Pas ou peu de matières consommables.	Investissement très important. Risques d'odeurs. Traitement des jus. Entretien rigoureux.	Revalorisation agricole de produit terreux. Décharge. Incinération (après émottage).	> 300 000
Boues digérées + déshydratation avec filtre à bandes ou centrifugeuse + séchage plus ou moins partiel. MS = 20-25 % et 80-90 %.	Produit final de siccité variable par mélange des boues séchées avec les boues déshydratées. Autonomie thermique pour MS = 30-40 %.	Investissement important. Frais de réactifs. Frais de combustible si séchage de la totalité des boues.	Revalorisation agricole de produit pâteux et terreux. Humus. Décharge. Incinération.	> 100 000
Boues digérées + déshydratation sur filtre-presse + séchage partiel et remélange. MS = 50-60 %.	Produit final de siccité variable par mélange des boues séchées et déshydratées. Autonomie thermique.	Investissement très important. Frais de réactifs élevés.	Revalorisation agricole de produit terreux. Humus. Décharge. Incinération.	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

. **Pompes**

Le choix des pompes est également fondamental. Si, pour des boues de faible concentration, des pompes centrifuges à canaux ouverts et à effet vortex peuvent être retenues, des pompes volumétriques (du type à rotor excentré ou à piston) doivent être installées pour les boues primaires, les boues épaissies et les boues flottées (voir page 676).

. **Manutention des boues**

La qualité d'un atelier de déshydratation de boues dépend souvent d'une manutention sûre, propre et fonctionnelle du produit. Le mode de manutention doit être adapté à la nature de la boue. Si la manutention par tapis transporteur est généralement la solution la plus courante, les boues visqueuses ou pâteuses peuvent être transférées par tuyauteries sur de petites distances au moyen de pompes volumétriques à rotor excentré, éventuellement équipées de gaveurs. Sur des distances importantes ou avec des boues solides (terreuses), un mode de transport entièrement clos peut être envisagé avec des pompes à piston du type "pompe à béton".

Les convoyeurs en auge avec chaîne sans fin sont fréquemment utilisés sur les gâteaux de filtres-presses; les transporteurs type "redler" sont adaptés au transport de boues émottées, de granulés, de cendres.

. **Stockage des boues**

Si un stockage de boues déshydratées est nécessaire, des silos avec parois à très forte pente asymétriques ou à contrepente sont indispensables. Ils doivent être équipés de puissants organes d'extraction (organes de râclage et/ou vis d'extraction).

Suivant leur nature, leur état de "fraîcheur" et le mode de conditionnement, les boues sont souvent source de corrosion. Le choix du type de protection est important; une boulonnerie en acier inoxydable est souhaitable.

La corrosion est accélérée par l'humidité ambiante; les surfaces d'évaporation sont à limiter (manutention en enceinte close, hotte) et les locaux doivent être soigneusement ventilés.

Le flux malodorant peut être limité à la source en réduisant les zones d'exposition des boues à l'air. S'il devient excessif, compte tenu de l'environnement, une désodorisation doit être envisagée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. INGÉNIERIE DES STATIONS D'ÉPURATION

6.1. CONCEPTION GÉNÉRALE

6.1.1. Facteurs de choix du traitement

La station d'épuration comprend essentiellement:

- une ou plusieurs chaînes de traitement d'eau (sous-chapitre 4),
- une ou plusieurs chaînes de traitement des boues (sous-chapitre 5).

L'alimentation en eau usée est assurée à partir d'un ou plusieurs ouvrages d'arrivée d'eau brute (avec trop-plein et possibilité de by-pass) et éventuellement de stations de relevage d'eau brute (vis d'Archimède ou pompes centrifuges). Un pompage de relèvement de l'eau traitée avant rejet en rivière peut parfois être nécessaire (en permanence ou seulement en période de plus hautes eaux). Cette solution, qui autorise un écoulement normalement totalement gravitaire en amont, permet de disposer tous les ouvrages au niveau du sol; elle entraîne par contre souvent la sujétion de prévoir un rabattement de nappe lors de la vidange des ouvrages.

La conception d'une station dépend évidemment du niveau de traitement recherché, mais aussi d'autres paramètres:

- importance de l'installation qui influe sur:
- le nombre de lignes de traitement,
- le nombre d'ouvrages par ligne de
- traitement,
- programme de réalisation, qui peut conduire à des découpages différents pour obtenir des lignes de traitements homogènes à terme,
- destination finale des boues,
- sécurité de fonctionnement, qui peut inciter à doubler des ouvrages ou prévoir des by-pass partiels,
- place disponible, environnement, conditions géotechniques, etc.

6.1.2. Implantation et distribution des ouvrages

Sont à prendre en considération:

- les contraintes hydrauliques (niveau et position des points d'arrivée et de rejet, by-pass, niveaux du milieu récepteur à l'étiage et en temps de crue, niveau de la nappe), pour optimiser la ligne piézométrique en fonction non seulement du traitement, mais aussi des conditions géotechniques et économiques,
- les contraintes d'exploitation, qui conduisent à regrouper, autant que faire se peut, les ouvrages par niveau d'exploitation et/ou de maintenance

prétraitement près de l'atelier de déshydratation, centrales de pompage ou de production d'air, postes de transformation près des points de forte consommation, etc.,

- l'accessibilité pour le nettoyage des ouvrages (ouvrages enterrés ou remblais) et pour l'entretien ou manutention rationnelle des équipements (voirie).

Le choix final est un compromis entre des astreintes techniques multiples, des coûts d'investissements et des contraintes d'exploitation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

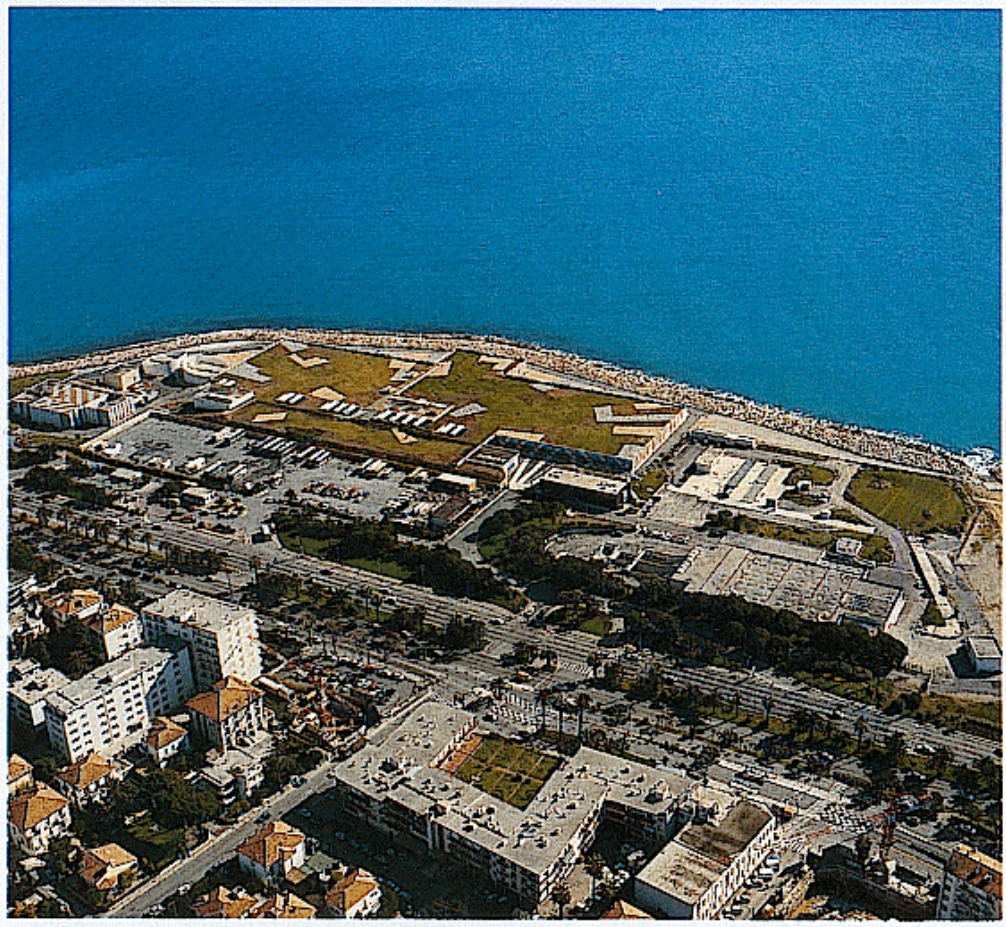


Figure 887. Municipal wastewater treatment plant in Nice, France. Capacity: 650,000 PE. Aerial view of the completely covered plant built on reclaimed land and consisting of:
- *10 lamellae primary settling tanks, preceded by straining,*
- *two biological reactors, 8 m deep,*
- *clarification in 12 rectangular secondary suction type settling tanks,*
- *sludge thickening and dewatering using filter presses,*
- *deodorization of buildings.*

Figure 887. Installation de NICE (Alpes-Maritimes). Capacité: 650 000 éq. hab. Traitement des ERU. Vue d'ensemble de la station entièrement couverte, sur terrain reconquis sur la mer avec:
- décantation primaire sur 10 décanteurs lamellaires précédée d'un tamisage,
- deux réacteurs biologiques de 8 m de profondeur,
- clarification sur 12 décanteurs secondaires rectangulaires sucés,
- épaississement et déshydratation des boues par filtres presses,
- désodorisation des enceintes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.1.3. Contrôle - Régulation Gestion

Une autre part essentielle de l'ingénierie de base des stations d'épuration est de définir le niveau de contrôle souhaité en fonction des objectifs de fiabilité et de performance.

Ce contrôle comprend

- l'acquisition des données (capteurs),
- les automatismes,
- la télésurveillance,
- le traitement des informations (alarmes, maintenance, gestion),
- l'assistance à l'exploitation.

L'arrivée de la micro-informatique a totalement bouleversé la situation technico-financière, si bien qu'une gestion informatisée plus ou moins évoluée peut être envisagée pour toutes les catégories d'installation.

6.1.3.1. Acquisition des données -Capteurs

Les mesures analogiques qu'il est possible de saisir en continu sur une station d'épuration d'eaux résiduaires (hors séchage et incinération) sont récapitulées dans le tableau 89.

Il est a noter que, si certaines mesures sont fiables, l'hétérogénéité des produits transitant dans une station d'épuration conduit à prendre certaines précautions sur d'autres: de nombreuses grandeurs utiles pour la conduite du traitement ne sont pas encore susceptibles de mesure automatique en continu.

6.1.3.2. Automatismes

(Voir page 1132)

6.1.3.3. Télésurveillance

Pour des raisons évidentes de coût, beaucoup d'installations de traitement d'eaux résiduaires "tournent" nuits et week-ends sans présence humaine; les performances globales s'en ressentent car les incidents de procédé, ou mécaniques, sont souvent constatés trop tardivement Les possibilités de la télématique permettent de mettre en place un service d'astreinte économique, le personnel contrôlant la station à distance et ne s'y déplaçant qu'à bon escient.

6.1.3.4. Traitement des informations

La micro-informatique et le développement de logiciels permettent aujourd'hui la mise en œuvre de systèmes informatiques de gestion des données, ces dispositifs remplacent les tableaux synoptiques et enregistrements classiques: ils permettent certains calculs pouvant lancer des commandes et autorisent le stockage des relevés pour traitement ultérieur.

6.1.3.5. Assistance à l'exploitation

Toujours par voie informatique, il devient de plus en plus recommandé d'assister l'exploitation tant pour la maintenance du matériel (gestion du stock de pièces de rechange, programmation des interventions électromécaniques que pour l'aide à l'exploitation. Il s'agit alors de mettre en œuvre des logiciels de **maintenance assistée par ordinateur (MAO)** ou de logiciels du type expert (intelligence artificielle).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 89. Principaux capteurs d'une station d'ERU.

Grandeur mesurée	Gamme d'emploi habituel (éq. hab.)	Fiabilité	Observations
DÉBIT D'EAU			
- Brute			
Écoulement libre	> 10 000	+++	
Tuyauterie en charge	> 100 000	++	
- Traitée			
Écoulement libre	Toute gamme	++++	
Tuyauterie en charge	> 100 000	++	
DÉBIT DE BOUES			
Écoulement libre	> 50 000	+++	
En charge	> 100 000	++	
DÉBIT D'AIR	> 100 000	+++	
TENEUR EN 0_2 DISSOUS	> 10 000	+++	
TEMPÉRATURE			
Air procédé	> 100 000	++++	
Eau	> 100 000	++++	
Boues (digestion)	> 30 000	+++	
pH, SALINITÉ	> 100 000	+++	
rH	> 20 000	+++	Peut se combiner à la mesure d'O_2, voire s'y substituer
CONCENTRATION			
MES effluent traité	> 50 000	+++	
MES de boues activées	> 100 000	++	
MES de boues secondaires recirculées	> 100 000	++	
MES de boues fraîches ou digérées	> 100 000	+	
Lits de boues (niveau)	> 50 000	+++	
DCO	> 100 000	++	
CO_2	> 100 000	++	en digestion

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.1.4. Coût d'exploitation

L'exploitation d'une station d'épuration' est une lourde charge pour la collectivité. La conception initiale doit intégrer cette préoccupation de réduction des dépenses de fonctionnement.

Il s'agit alors de considérer particulièrement:

- les dépenses en énergie électrique qui peuvent orienter le choix vers
  - le type de relèvement (vis ou pompe),
  - le procédé (boues activées, lit bactérien, lit granulaire),
- le dispositif d'oxygénation (aération de surface, diffusion d'air par fines bulles, bassin profond, etc.), - les dépenses en matières consommables, surtout celles du conditionnement des boues (réactifs organiques ou minéraux, fioul, etc.),
- les frais de personnel dont le nombre et la qualification dépendent de l'importance de l'usine, de sa complexité et de son niveau d'automatisation et de contrôle (astreinte et télésurveillance, GTC et assistance à l'exploitation...),
- les frais effectifs d'évacuation des boues, y compris les coûts de transport, d'épandage ou de destruction,
- les frais d'entretien et de maintenance. Un calcul par annuités, tenant compte de l'amortissement des investissements, si complexe soit-il, est l'une des solutions les plus réalistes permettant la comparaison de diverses filières.

Ce calcul devrait, en toute logique, tenir compte du fait que, dans la majeure partie de sa période d'utilisation, une station d'épuration ne traite normalement qu'un débit inférieur à son débit nominal.

6.2 HYDRAULIQUE ET VANNAGES PNEUMATIQUES

L'exactitude des calculs hydrauliques, le choix de vitesses de circulation appropriées, une disposition et une conception correcte des ouvrages de répartition et de liaison sont la base d'une bonne ingénierie.

Les transferts d'eaux résiduaires chargées, à des débits parfois importants, peuvent poser un certain nombre de problèmes de vannage et de régulation hydraulique, entre autres

- l'écrêtage automatique des débits de pointe: à l'entrée de la station (limitation du débit d'entrée des eaux brutes), à l'amont des décanteurs primaires, à l'amont des bassins d'épuration biologique,... avec évacuation directe (gravitaire) des débits excédentaires vers l'exutoire,
- l'équipartition, ou une répartition modulée programmée, des débits sur des ouvrages similaires fonctionnant en parallèle,
- la possibilité de différentes répartitions du débit dans les bassins d'aération (écoulements en parallèle, en série, en alimentation étagée, etc.) ou une égalisation du taux d'oxygène dissous dans la masse liquide.

Ces problèmes peuvent être résolus par l'adoption de vannages pneumatiques, manuels ou automatiques, pouvant couvrir une large gamme de débits (de quelques $m^3.h^{-1}$ à plus de 20 $m^3.s^{-1}$) en ne créant qu'une perte de charge limitée (quelques décimètres de CE), et présen-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tant un certain nombre d'avantages sur les vannes rideaux, en particulier

- de ne posséder aucune pièce mécanique mobile immergée (pas d'usure, protection aisée contre la corrosion),

- d'être à l'abri de toute obstruction par des corps étrangers, la large section de passage étant toujours libre, même à faible débit.

Le principe général de ces appareils (figures 888 et 889) est de faire transiter gravitairement un débit d'eau d'un plan d'eau amont N1 à un plan d'eau aval N4 (plus bas de H), par passage sur un déversoir NS coiffé d'une hotte étanche S plongeant sous N1 et N4 et réalisant un écoulement en siphon.

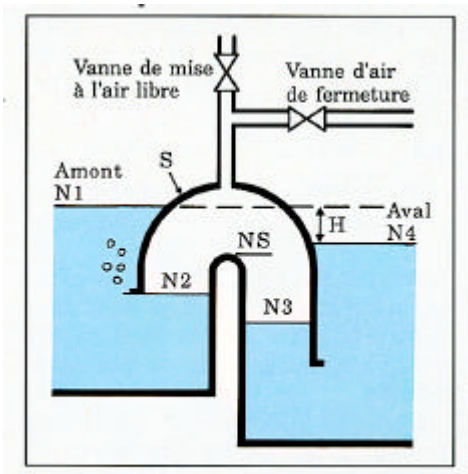


Figure 888. Bonde siphoïde à compression (en position fermée).

Le débit d'eau est modulé (ou interrompu) en réglant (ou en annulant) la hauteur d'eau h sur le déversoir NS, au moyen d'une poche d'air, en pression (si NS est plus bas que N1) ou en dépression (si NS est plus haut que N1), dans la hotte S. ,

Parmi les différents types d'appareil,

on peut distinguer par ordre de possibilités d'asservissement croissantes: - les bondes-siphoïdes partout ou rien, à compression ou à dépression, - les siphons comprimés limiteurs de débit, - les siphons régulateurs partialisés en dépression, fonctionnant en déversoirs déprimés: loi d'écoulement $Q = f(h^{3/2})$, ou en amorçage total: loi d'écoulement à régime maximal $Q = f(h^{1/2})$.

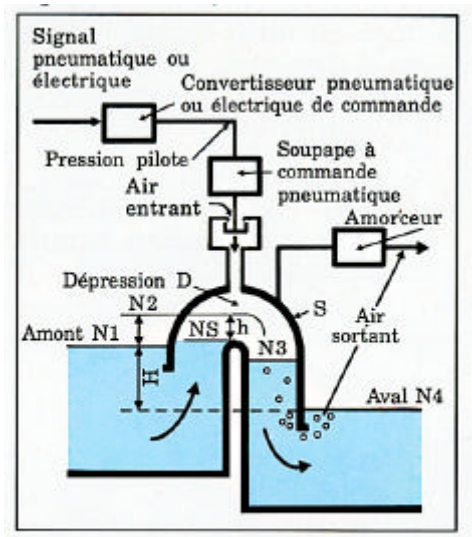


Figure 889. Siphon régulateur. Fonctionnement en déversoir déprimé.

Dans ces derniers appareils, la partialisation (c'est-à-dire le maintien, à un instant donné, d'un régime d'écoulement défini inférieur au régime de plein amorçage) est obtenue en assurant dans la hotte la dépression D caractéristique du régime partiel à cet instant, par réglage d'un débit d'air "entrant"• équilibrant le débit d'air « sortant » (extrait artificiellement ou bien entraîné par l'écoulement dans la branche aval de la hotte).

L'entrée d'air de partialisation est

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

réglée par une soupape automatique, généralement à commande pneumatique (exemple, régulateur hydropneumatique Y. PONSAR) ; la soupape peut être pilotée par un système pneumatique (ex.: surveillance d'un plan d'eau par bullage d'air) ou électrique (ex.: intégration dans une chaîne de régulation avec automate programmable). La soupape peut éventuellement être remplacée par une vanne de régulation.

L'amorçage du siphon nécessite de créer une dépression initiale qui peut être obtenue par différents moyens (ventilateur dépresseur, éjecteur d'air, tireur d'air hydraulique, etc ...). Le siphon désamorcé (mis à l'air libre) se comporte comme une vanne fermée interdisant tout écoulement (pour autant que N1 ne puisse pas dépasser NS).

Des problèmes de vannage et de régulation hydrauliques très variés peuvent être résolus par les siphons partialisés asservis, par exemple

- réglage du plan d'eau amont ou aval,
- réglage de débit fixé, limité, ou programmé, indépendamment des niveaux liquides amont et aval,
- fonctionnement en compensateur de charge, etc.

Leur utilisation n'est pas limitée au traitement des eaux (exemples: réseaux d'égouts - gestion des eaux pluviales canaux d'irrigation -by-pass d'écluses sur canaux de navigation, etc ...).

figure 890. Poste de pompage de CLICHY (Hauts-de-Seine) pour le SIAAP. Siphon régulateur de débit. Débit: 12 $m^3.s^{-1}$.

6.3. AÉRATION ET PRODUCTION D'AIR

L'oxygénation des boues activées peut être assurée par aérateurs de surface (turbines, brosses) ou par insufflation d'air.

En général, les installations de plus de 100 000 habitants sont équipées de systèmes d'aération par diffusion d'air; les raisons d'un tel choix sont

- la limitation en nombre des machines tournantes et leur regroupement (entretien et maintenance plus aisés),
- le meilleur rendement; les diffuseurs à fines bulles sous 4 m ou les aérateurs statiques sous 8 m présentent des performances supérieures aux aérateurs de surface,
- la possibilité d'une régulation plus fine, source d'économie énergétique,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- la protection de l'environnement par la limitation des aérosols et des bruits.

6.3.1. Centrale d'air

Les appareils de production d'air sont disposés dans un bâtiment insonorisé ou enterré; un traitement acoustique soigné (portes isophoniques, sas, silencieux sur les aspirations d'air, traitement des murs) permet une atténuation du bruit de 10 à 3 0 dB à l'intérieur, et de 2 0 à 3 0 dB à l'extérieur, suivant la qualité de l'ouvrage et les bandes de fréquence concernées (page 1331). Pour les très grosses machines tournantes, il est même recommandé d'isoler chaque appareil dans une cellule indépendante.

Le choix des machines tournantes s'effectue en fonction des caractéristiques aérauliques des groupes, de leurs possibilités de régulation, de leurs rendements énergétiques, de la qualité de leur construction mécanique et, bien entendu, de leurs coûts d'investissement et d'entretien.

Le tableau 90 résume les caractéristiques principales des différentes machines de production d'air.

Lorsque la diffusion se fait par« corps poreux », une filtration de l'air est nécessaire pour éviter l'accumulation de poussières à l'intérieur des diffuseurs. Il faut ramener le taux de poussière dans l'air filtré à environ 15 mg par 1000 Nm^3 d'air. La filtration s'effectue généralement en deux phases

- pré-filtre, avec efficacité pondérale de 80 à 90 %,
- filtre de finition, par exemple du type filtre à poches en tissu de verre à média sec.

La perte de charge globale de la filtrationpeut être de l'ordre de 20 à 50 mm de CE.

Une ventilation particulière de la salle des machines est à envisager dans les pays chauds et également si le débit d'air est aspiré dans un collecteur unique commun aux machines, relié à l'extérieur; en effet, outre l'énergie dissipée par les moteurs, il faut tenir compte de la chaleur dissipée par le corps des machines et les tuyauteries qui peuvent atteindre 80° C (la montée en température de l'air refoulé est de l'ordre de 10-12 ° C par m de CE de surpression).

6.3.2. Réseau de distribution d'air

Les collecteurs généraux doivent être conçus en tenant compte de la pression et de la température de l'air surpressé ; il y a parfois lieu de les calorifuger pour des raisons de sécurité. S'ils sont réalisés en béton armé, des joints de dilatation doivent être prévus ainsi que des revêtements anti-porosité et anti-poussière, particulièrement dans le cas de "diffuseurs poreux".

Des lyres de protection doivent être mises en place pour éviter les retours d'eau; une garde de 1m doit être respectée. Ces lyres peuvent être installées sur les collecteurs généraux ou sur les canalisations alimentant les ramifications de fond.

En fonction des diamètres, ces canalisations d'alimentation peuvent être réalisées en matière synthétique ou en acier galvanisé; l'acier inoxydable est recommandé pour une meilleur tenue dans le temps. Quant aux ramifications, l'emploi de matériau synthétique est le plus fréquent: il faut alors veiller aux problèmes de dilatation, surtout pour les fortes profondeurs.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 90 - Gamme d'utilisation des machines de production d'air

Type de machine	**Plage de débit unitaire (vitesses usuelles)**	**Pression m de CE**	**Variation Puissance P maximale en fonction vitesse N**	**Possibilité de régulation**	**Observations**
Surpresseurs volumétriques système ROOTS	< 6 000 m3.h-1. (750 à 1500 t.miri 1)	< 6	kN	- plusieurs machines - moteurs bi-vitesse - vitesse variable	
Soufflantes centrifuges	> 10 000 m3.h-1 (1000 à 3 000 t.min ')	< 6	kN3	- modification de l'orientation des ventelles - vitesse variable	
Compresseurs à vis	< 5 000 M3 h-' (750 à 1500 t.miri 1)	> 15	kN	- plusieurs machines - moteur bi-vitesse - vitesse variable	
Turbo-compresseur	> 5 000 m3.h-1. (8 000 à 25 000 t.miri ')	15 et au-delà	kN3	- modification de l'orientation des ventelles	- possibilité de variation de débit: 1 à 3

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.4. VALORISATION DU BIOGAZ

Plusieurs modes de récupération énergétique à partir des sources de chaleur disponibles sont envisageables sur une station d'épuration.

Une des sources importantes est l'effluent lui-même et l'installation de pompes à chaleur, profitant de la différence de température entre effluent et milieu récepteur ou entre effluent et atmosphère, a été envisagée mais l'importance des investissements nécessaires n'a pas permis de réalisation significative.

Dans les stations comportant une installation d'incinération des boues, une récupération calorifique importante est recherchée sur les fumées par réchauffage de l'air de combustion; une production d'énergie électrique par turboalternateur peut aussi être prévue à partir des gaz chauds mais la puissance fournie est du niveau de celle nécessaire sur le seul poste d'incinération. L'intérêt d'une telle récupération est donc très limité et cette production d'énergie électrique directement dépendante du fonctionnement du four n'est pas modulable.

Dans les installations de conditionnement thermique des boues, une récupération calorifique par échangeurs de chaleur à contre-courant est couramment pratiquée (voir page 961) ; elle est envisageable aussi sur les effluents chauds d'une installation de méthanisation.

La valorisation du gaz de digestion demeure le mode de récupération énergétique offrant le plus de possibilités. L'utilisation du gaz dépend

- des besoins à satisfaire (chaleur, électricité),
- du coût des énergies d'appoint (électricité, fioul, gaz naturel),
- des objectifs recherchés (économies, souplesse d'exploitation, sécurité sur la continuité du service).

En général, la vente de gaz à un utilisateur extérieur est possible mais ne s'avère pas rentable du fait des exigences imposées: sécurité d'approvisionnement, traitement, compression, éventuellement nécessité d'enrichir et/ou d'odoriser le gaz, etc. Il en est de même de l'utilisation comme combustible pour la traction des véhicules qui exige traitement, mise en bouteilles sous pression de l'ordre de 100 bars, adaptation du parc automobile...

L'utilisation du gaz pour les besoins énergétiques de la station est nettement plus avantageuse. Un des grands intérêts du gaz de digestion est sa relative **commodité de stockage** permettant de répondre à des besoins énergétiques **variables à l'échelle de la journée.**

6.4.1. Production directe de chaleur

Ce mode d'utilisation est le plus simple et, généralement, le plus rentable surtout si les besoins à couvrir varient peu. Le réchauffage des digesteurs est une application courante, mais un cas idéal est celui du conditionnement thermique des boues: par l'intermédiaire de chaudières adaptées, le gaz permet de maintenir les digesteurs en température et de porter les boues à la température de cuisson.

Si une incinération est prévue, le gaz peut assurer un apport énergétique, mais la déshydratation préalable doit être poussée si l'on veut assurer l'auto-combustibilité, car le pouvoir calorifique de la matière sèche est faible.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Une utilisation intéressante est celle du chauffage de locaux ou, mieux, de production d'eau chaude dont les besoins sont plus constants.

6.4.2. Production d'énergie mécanique à partir de moteurs thermiques

assurant:

- la fourniture d'énergie électrique par l'intermédiaire d'alternateurs,
- ou l'entraînement direct de machines tournantes (production d'air surpressé, pompage) mais cette solution manque de souplesse et, bien que présentant théoriquement des rendements énergétiques supérieurs, n'est pratiquement plus utilisée.

6.4.3. Production d'énergie électrique

La production d'énergie électrique s'accompagne d'une récupération de chaleur sur les circuits de refroidissement et sur les gaz d'échappement qui est utilisée prioritairement pour le chauffage des digesteurs. Suivant les techniques, le rapport d'énergie électrique fournie à l'énergie calorifique récupérée varie.

Les moteurs thermiques sont de trois types

. **Moteurs Diesel Dual**- Fioul

Ces moteurs, très couramment utilisés, ont l'avantage d'être pratiquement insensibles aux variations du pouvoir calorifique du gaz et présentent une grande sécurité d'exploitation. L'allumage se fait par injection de fioul dit "fioul pilote" à raison d'une consommation régulière de 6 à 7% de la consommation totale. La production d'électricité est de 2,1 kWh par Nm^3 de gaz à pleine charge, alors que la récupération fournit 2,4 thermies, soit un rendement énergétique total de 70 % environ compte tenu du fioul pilote.

A mi-charge, la production d'électricité est de 1,9 kWh par Nm^3 de gaz avec un rendement global de l'ordre de 62 %.

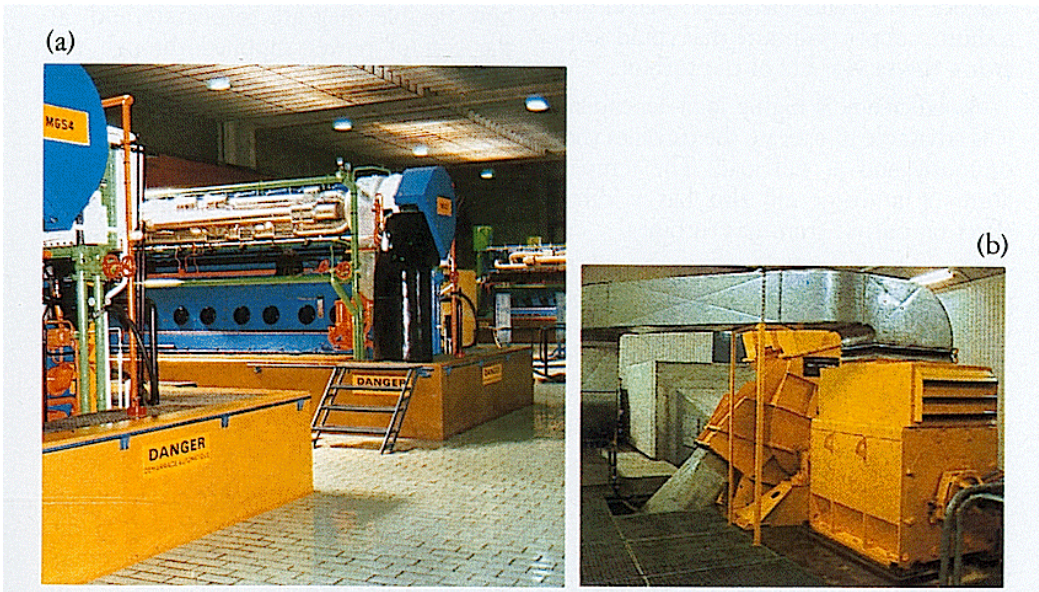


Figure 891. Achères III treatment plant for the SIAAP, France. Air production (a) and power generating (b) equipment. Total capacity: 10,000 kW.

Figure 891. Station d'épuration d'ACHÈRES III (Yvelines) pour le SIAAP. Centrale de production d'air (a) et centrale électrique (b). Puissance totale: 10000 kW.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

. **Moteurs Diesel à allumage électrique**

Ces moteurs fonctionnent au gaz de digestion sans apport de fioul-pilote. Ils comportent un carburateur comme les moteurs à essence et l'allumage est électrique. Rapporté au Nm3 de gaz utilisé, la production d'électricité est de 1,9 kWh et la chaleur récupérée de 2,5 th conduisant à un rendement global de 75 % à pleine charge.

A mi-charge, la production d'électricité est de 1,7 kWh par Nm^3 de gaz et la chaleur récupérée de 2,7 th alors que le rendement global est inchangé.

. **Turbines à gaz**

Leur rendement mécanique sur l'arbre est inférieur à celui des moteurs; par contre, toute la chaleur récupérable se retrouve dans les gaz d'échappement à haute température, ce qui penne, d'accroître les rendements d'échange et de produire de la vapeur.

Ces machines nécessitent un traitement poussé du gaz (élimination des poussières et de l'eau). Il faut aussi vérifier que le gaz ne contient pas certains éléments indésirables (vanadium, sodium, cuivre, soufre) mettant en cause la longévité de la turbine.

Le rendement étant très sensible à la charge, il est souhaitable de faire fonctionner ces turbines en continu à pleine charge. La température de l'air atmosphérique influe directement sur la production des turbines à gaz.

Une turbine à gaz produit à pleine charge 1,6 kWh par Nm3 de gaz utilisé et autorise la récupération de 2,9 th, correspondant à un rendement global de 78 %. La possibilité d'utilisation la plus régulière possible de la chaleur disponible est un paramètre de choix tout à fait essentiel de ce type de groupe électrogène.

6.4.4. Autonomie énergétique et économie d'exploitation

Ces deux objectifs ne sont pas toujours compatibles. L'autonomie ou un certain degré d'autonomie peuvent être recherchés soit au niveau énergétique global, soit au seul niveau de l'énergie électrique.

Une priorité donnée à l'autonomie est justifiée par la continuité à assurer de l'épuration, eu égard à des aléas extérieurs jugés importants.

Dans tous les cas, le choix des équipements et de leurs conditions de mise en oeuvre ne doit pas être fondé sur les seuls rendements énergétiques globaux théoriques mais sur les rendements réels (électriques et globaux) ainsi que sur les coûts de maintenance des unités électromécaniques. Le temps nécessaire aux révisions ne doit pas être oublié pour fixer le nombre de groupes.

La rentabilité de la récupération énergétique par des moteurs thermiques est très dépendante de leur souplesse d'utilisation et de la tarification de l'énergie électrique fournie par le réseau. Ces tarifications sont de plus en plus contrastées et le prix du kWh peut varier de 1 à 10, voire plus, suivant les périodes de l'année (voir page 5 5 0). Il peut s'avérer extrêmement profitable de produire de l'énergie électrique pendant les périodes de pointe alors qu'à d'autres, il vaut mieux acheter le courant du réseau public et utiliser le gaz pour répondre à une demande de chaleur. Le dimensionnement de l'ensemble chaudières- moteurs doit être optimisé dans chaque cas suivant les contraintes fixées, la. nature des installations de traitement -boues en particulier et les conditions de tarification.

Dans tous les cas de mise en œuvre d'une centrale électrique, il faut prévoir les équipements qui peuvent s'avérer indispensables en cas d'arrêt de la centrale: par exemple chaudières de digesteurs, alimentation électrique et poste de transformation suffisant, etc.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Le degré d'autonomie énergétique rendu possible par l'utilisation de gaz de digestion varie largement suivant les chaînes de traitement d'eau et de traitement des boues mises en ceuvre. Dans le cas où l'épuration se limite à une seule décantation primaire, la station équipée d'une centrale électrique est normalement autonome sur le plan énergétique global. Dans le cas d'épuration biologique de la pollution d'origine carbonée, avec oxygénation par aérateurs fines bulles, le tableau ci-contre donne, pour différents types de traitement de boues mis en œuvre, les taux approximatifs d'autonomie énergétique de stations d'épuration d'ERU DBO_5 : 200 $mg.l^{-1}$, MES 200 $mg.l^{-1}$) équipées de digesteurs.

Traitement de boues	Niveaux d'autonomie moyens (%)	
	Énergétique	Électrique
Lits de séchage	70	60
Filtres à bande	65	55
Conditionnement thermique + filtres-presses	40	40

Avec des ERU plus concentrées en pollution organique, le degré d'autonomie s'améliore.

6.5. LUTTE CONTRE LES NUISANCES

6.5.1. Odeurs

6.5.1.1. Polluants rencontrés dans l'air des stations d'épuration des ERU

Les odeurs provenant des installations d'une station d'épuration, trouvent leurs origines dans les gaz ou vapeurs émis par certains produits contenus dans les eaux usées; elles proviennent également de produits qui se forment au cours des différents stades de l'épuration. Les caractéristiques des eaux usées ainsi que les types de traitement, en particulier ceux concernant les boues, ont une influence sur la nature et l'intensité des odeurs. La liste qui suit donne une idée de la diversité des polluants que l'on peut rencontrer dans l'air d'une station.

Composés azotés	
Ammoniac	NH_3
Amines	$R\text{-}NH_2$, $R_2\text{-}NH$, $R_3\text{-}N$
Oxydes d'amines	$RH_2\text{-}NO$, $R_2H\text{-}NO$, $R_3\text{-}NO$
Oxydes d'azote	NO_x
Composés soufrés	
Dihydrogénure de soufre	H_2S
Mercaptans	R-S-H, R-S-R
Hydrocarbures	
Saturés et/ou	
insaturés	
Aromatiques	
Dérivés chlorés	
Composés divers	
Aldéhydes	R-CHO
Acroléine	$CH_2 = CHCHO$
Alcools	$R\text{-}CH_2OH$
Acides gras saturés et/ou insaturés	
Scatole	
Sulfures d'amines	$R_2 = N\text{-}S\text{-}N = R_2$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Un classement des sources d'odeurs par ordre d'importance est difficile, mais, la plupart du temps, les postes suivants sont les plus concernés

- prétraitement dans son ensemble, -puits à boues,
- épaississeurs de boues,
- conditionnement et déshydratation des boues,
- réception et traitement des matières de vidange.

La concentration en polluants est très variable d'une station à l'autre, ainsi que d'un poste à l'autre sur une même station (voir tableau ci-dessous).

6.5.1.2. La lutte contre les odeurs

Celle-ci passe par deux voies, différentes mais complémentaires

- la limitation des émissions,
- le traitement des gaz.

Elle contribue également à la lutte contre la corrosion.

a - La limitation des émissions

C'est la première démarche à effectuer. Elle correspond

- à un traitement en phase liquide permettant d'empêcher le dégagement des produits malodorants et/ou de les dégrader chimiquement.

Ceci se fait par ajout de produits chimiques divers selon les cas ($FeCl_3$, $FeS0_4$, chaux, agents oxydants). Des essais sont nécessaires, dans tous les cas, pour évaluer les consommations de réactifs qui peuvent être souvent importantes.

Ce type d'action est nécessaire dans le cas d'effluents fortement septiques, avec production d'H_2S (en particulier cas de refoulement sous pression).

- et surtout à une limitation des odeurs par action sur les conditions d'émission. Il faut, dans la mesure du possible, respecter quelques règles simples
- limitation des chutes et autres lieux de dégazage (goulottes des décanteurs et épaississeurs, reprises de filtrats de filtres-presses...)

Fourchettes de concentrations de quelques polluants atmosphériques, rencontrés sur différents postes d'une station d'épuration.

En mg de polluant par Nm_3 de gaz				
	Acide acétique	H_2S	Mercaptans	NH_3
Dessablage-dégrillage	1 à 10	1 à 3	0,5 à 1	1 à 3
Décanteur primaire	1 à 5	0,5 à 1	0,2 à 0,5	1 à 3
Puits à boues primaires	-	10 .à 500	2 à 250	
Bassin d'aération	1 à 5	< 1	< 0,5	
Décanteur secondaire	1 à 5	< 1	< 0,5	
Épaississeur boues		5 à 30	2 à 10	2 à 10
Déshydratation des boues	10 à 25	10 à 50	2 à 15	5 à 25
Matières de vidange		10 à 100	5 à 30	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

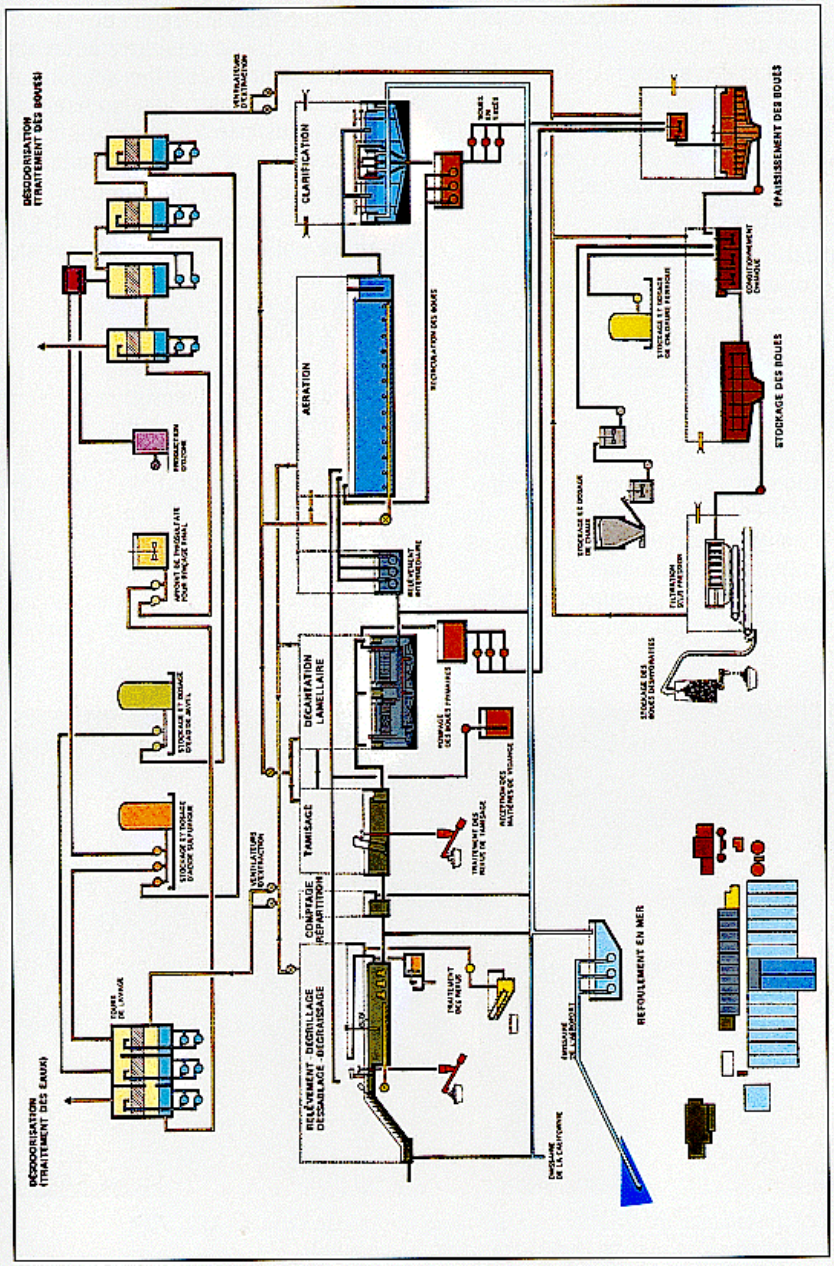


Figure 892. Station d'épuration de la ville de NICE (Alpes-Maritimes). Schéma des installations de désodorisation. Station couverte. Capacité : 650 000 éq. hab.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- alimentation des ouvrages aussi continue que possible,
- extraction des boues régulière et fréquente,
- limitation des temps de séjour, des températures et des stockages inutiles, - couverture des ouvrages.

b - Le traitement des gaz

. Ventilation

Pour traiter les gaz malodorants, il faut les prélever et les diriger vers l'installation de traitement. Dans la majorité des cas, la mise en dépression des locaux à ventiler est la règle.

Un débit de ventilation assurant entre 5 et 15 renouvellements par heure, suivant la pollution de l'air et la pureté d'atmosphère désirée, est suffisant. Un taux de 10 à 15 est généralement pratiqué dans les endroits où du personnel séjourne.

De nombreuses techniques de traitement existent, celle par lavage de gaz est la plus économique. Pour de faibles débits de gaz il faut comparer le lavage avec l'adsorption sur charbon actif ou sur "sulfurex". La concentration moyenne de la pollution gazeuse à l'entrée du traitement est souvent le critère de choix.

Dans le cas d'une incinération des boues, il est recommandé d'alimenter le four en air pollué provenant des locaux malodorants.

. Lavage de gaz

Le but à atteindre est le transfert des polluants de la phase gazeuse vers la phase liquide. Cette absorption est souvent accélérée par une réaction chimique du gaz dissous avec un constituant de la phase liquide. Le réactif de la liqueur de lavage est consommé et doit être remplacé.

La sélectivité de la liqueur vis-à-vis du polluant à éliminer est de règle, mais elle est parfois impossible à obtenir; par exe mple,

Figure 893. Sludge treatment plant with deodorization unit in Marseilles, France. DS capacity: 70 t.d^{-1}. Overall view.

Figure 893. Installation de MARSEILLE (Bouches-du-Rhône). Capacité MS: 70 t.j^{-1}. Traitement des boues avec poste de désodorisation. Vue générale.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

dans le cas d'un lavage à la soude, la consommation par le CO_2 de l'air lavé est inévitable, alors que le CO_2 n'est pas gênant. Le contacteur gaz liquide DEGRÉMONT est la colonne à garnissage (voir page 862), travaillant le plus souvent à contre-courant et parfois, dans certains cas particuliers, à co-courant).

Un seul étage s'avère souvent insuffisant pour éliminer des odeurs très différentes. Il est alors nécessaire de mettre plusieurs étages en série, afin d'utiliser des liqueurs de lavage spécifiques.

. Choix des liqueurs de lavage

Pour chaque étage, la sélection s'effectue entre

- lavage à l'eau perdue (rarement suffisant),
- lavage acide pour ammoniac et amines diverses,
- lavage basique pour les produits soufrés ainsi que les AGV,
- lavage oxydant pour les produits soufrés,
- éventuellement lavage réducteur afin de limiter les odeurs d'oxydant (chlore ou ozone) à la sortie du poste de désodorisation.

Dans tous les cas (sauf le premier) un appoint de réactif est nécessaire; il peut être régulé soit par le pH, soit par la mesure de l'oxydant résiduel, soit encore par le potentiel redox.

Un appoint d'eau est également nécessaire pour compenser les pertes diverses; il doit se faire en eau adoucie dans certains cas particuliers.

. Efficacité

Elle est fonction de la qualité de l'air à traiter. Le lavage produit un air qui n'est jamais exempt totalement d'odeurs et l'efficacité parait faible si l'air à traiter est lui-même peu malodorant.

Elle peut être jugée de deux façons

- par méthode analytique. La méthode de barbotage est rapide, facile de mise en œuvre, mais ne peut doser que certains produits (H_2S Mercaptans, Amines, Aldéhydes légers). Celle par chromatographie gazeuse est complète et précise, mais très lourde et très coûteuse,
- par méthode olfactométrique. Elle fait appel soit au seuil de perception, soit à des intensités d'odeurs au-dessus du seuil. On peut rappeler à ce sujet que la perception physiologique des odeurs est de type logarithmique; plusieurs lois expérimentales ont été proposées pour relier l'intensité odorante perçue à la concentration d'un composé.

En conclusion, la mesure des odeurs reste très difficile. L'olfactométrie est une méthode assez lourde qui ne permet pas de déterminer des rendements; la mesure analytique, qui est coûteuse, et bien qu'elle ne prenne en compte qu'une partie des polluants, permet le meilleur inventaire des sources d'odeurs. C'est la plus adaptée à la recherche d'une solution optimale.

La détermination de rendement d'épuration reste malgré tout très délicate, compte tenu de la difficulté des mesures.

6.5.2. Le bruit

6.5.2.1. Paramètres caractéristiques

Le bruit est un son complexe caractérisé par l'amplitude et la fréquence des sons purs qui le composent. Il s'exprime en bel ou décibel (dB) selon une loi de type logarithmique.

Le bruit mesuré à la réception, ou **niveau de pression acoustique** Lp est donné par la formule:

$$L_p = 20 \text{ Log } \frac{Pi}{Po}$$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Lp : en décibel

Pi : pression de l'onde sonore, en Pascal

Po: pression de référence, égale à 2 $x10^{-5}$ Pascal (seuil d'audibilité)

Ce paramètre Lp, appelé également niveau sonore ou niveau de bruit, est celui couramment utilisé en pratique.

Le signal de mesure doit être pondéré pour traduire le comportement de l'oreille humaine. Trois courbes (A, B, C) correspondant à des niveaux sonores croissants sont utilisées.

La pondération du type A est habituellement retenue en acoustique industrielle.

6.5.2.2. Facteurs intervenants sur le degré de nuisance

. Le **bruit dans le temps** peut être:

- de type continu: fonctionnement continu de certains équipements, écoulement de trop-plein, ... c'est le bruit de fond,

- de type discontinu: à caractère aléatoire (relèvement des eaux) ou à caractère cyclique (équipements à fonctionnement programmé) ..., c'est le bruit émergent

Dans tous les cas, la nocivité d'un bruit est liée à son amplitude et à sa durée, d'où la définition d'un **bruit continu équivalent** ou leg : c'est le niveau de pression acoustique d'un bruit qui, en restant constant sur une certaine durée, donne la même énergie acoustique que l'ensemble des bruits de niveaux variables émis sur la même durée.

Cette grandeur est complétée par l'estimation du niveau acoustique d'évaluation (Lr) pour tenir compte du caractère impulsionnel d'un bruit ou de la présence de son à tonalité audible.

Ces notions sont utilisées pour évaluer la gêne et même les risques de perte d'audition.

. Le bruit dans l'espace

Il est dû à une directivité des émissions sonores. La propagation des bruits peut se faire par voie aérienne ou par voie " solidienne".

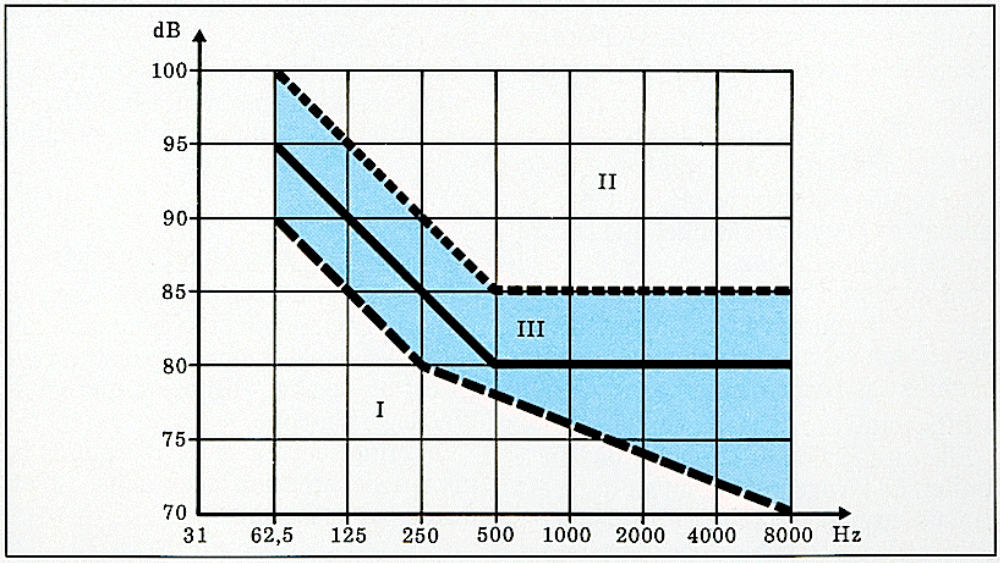


Figure 894. Courbes intensité du bruit-fréquence.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les émissions peuvent se faire à l'intérieur des locaux (en champ dit réverbérant) ou à l'extérieur (en champ dit libre).

C'est pourquoi les contraintes sur une station sont doubles

- les contraintes relatives à la protection du personnel, principalement à l'intérieur des locaux d'exploitation,
- les contraintes relatives à la protection de l'environnement.

En ce qui concerne la protection du personnel, il a été établi une courbe de niveau de bruit en fonction des fréquences qui donne les valeurs qu'il conviendrait de ne pas dépasser pour une exposition à un bruit complexe pendant une durée de huit heures, ces valeurs étant considérées "non lésionnelles pour une oreille normale".

Trois zones sont définies

- Zone I : les niveaux compris dans cette zone peuvent être considérés comme non dangereux, sinon comme non gênants.
- Zone II : les niveaux compris dans cette zone sont considérés comme dangereux. - Zone HI: dans cette zone, il y a présomption de danger.

La courbe qui se situe sensiblement dans l'axe de la zone III a été déterminée à partir de considération d'ordre physiologique. Elle constitue en quelque sorte la "cote d'alarme" préconisée.

L'évaluation de la nuisance d'une station de traitement d'ERU est faite à l'aide

Tableau 91. Niveaux de bruit considérés comme normaux pour différentes zones et périodes déterminées de la journée.

ZONES	PÉRIODES		
	Jour 7hà20h dB(A)	Intermédiaire 6-7h-20-22h dB(A)	Nuit 22h-6h dB(A)
Rurale, d'hôpitaux, de détente	45	40	35
Résidentielle suburbaine, faible circulation routière	50	45	40
Résidentielle urbaine	55	50	45
Résidentielle urbaine ou suburbaine, avec quelques ateliers ou centres d'affaires ou avec des routes à grande circulation	60	55	50
A prédominance d'activités commerciales et industrielles	65	60	55
A prédominance industrielle (industrie lourde)	70	65	60

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

d'une étude d'impact, qui prend en compte le **niveau acoustique initial** du site estimé et le niveau de bruit atteint avec les installations.

Le niveau de bruit généré par une station doit respecter des niveaux sonores perçus, à l'extérieur des locaux habités ou occupés par des tiers, mesurés à 2 m des murs. Ils sont résumés dans le tableau 91.

Le tableau 92 donne quelques valeurs de référence.

Le doublement du niveau sonore provoque une augmentation de pression acoustique résultante de 3 dBA.

Le doublement de la distance d'éloignement de la source du bruit provoque une diminution de niveau sonore de 6 dBA.

6.5.2.3. Origine des bruits sur une station

Les bruits sont classables en deux grandes catégories

- les bruits dus aux systèmes électromécaniques,
  - d'origine aérodynamique (ventilateurs, compresseurs, surpresseurs et bruit d'air dans les conduites),
  - d'origine électromécanique (moteurs, motoréducteurs, pompes, engrenages, ...),
- les bruits dus à l'eau, ou hydrodynamiques (écoulement, brassage, projection, ...).

Il est possible d'inventorier, d'une façon non exhaustive, ces bruits, poste par poste (tableau 93).

Tableau 92. Exemples de niveaux sonores.

Niveau de pression dB(A)	Sensation	Exemple
30	Calme	Chambre à coucher
60	Gênant pour un travail intellectuel	Conversation perçue à 1,50 m fenêtres ouvertes sur rue animée Ventilateur d'extraction d'air à 1 m
80	Fort	Hall de gare, carrefour animé
90	Début du danger de dommage auditif sur 8 hj^{-1}	Turbine d'aération: 95 dBA à 1 m Compresseur d'air: 100 dBA à 1 m, non capoté
120	Assourdissant Seuil de la douleur	Avion à réaction au décollage à 100 m

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 93. Origine des bruits dans une installation d'épuration

Origine du bruit / Poste de Traitement	Mécanique	Aérodynamique	Hydrodynamique
Relèvement	- Vis d'Archimède - Pompes en fosse sèche		- Trop-plein - Arrivée gravitaire
Prétraitement	- Grilles, vis à sable, tapis transporteurs, ponts racleurs - Claquement des grilles	- Surpresseurs	
Aération et biofiltration	- Turbines ou rotors d'aération - Compresseurs d'air (entraînement) - Pompage de recirculation - Pompes et surpresseurs de lavage (filtres)	- Compresseurs d'air - Tuyauteries aériennes - Surpresseurs d'air de lavage	- Gerbes de turbines ou de rotors
Décantation-Flottation	- Motoréducteurs de pont racleur - Pompes et pressurisation - Compresseurs d'air	- Compresseurs d'air	- Surverses
Traitement des boues	- Pompes à boues, en particulier pompes à membrane - Compresseurs d'air - Centrifugeuses - Dilacérateurs - Transporteurs (gâteaux, cendres) - Ventilateurs de sécheurs et de fours	- Compresseurs d'air	
Divers	- Ventilateurs d'extraction d'air	- Vannes pneumatiques - Circuits d'air comprimé - Tuyauteries d'air	

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.5.2.4. Principales règles de protection contre le bruit

. Situer loin et faire écran

Le choix du site est prépondérant: distance aux habitations, vents dominants, écrans acoustiques naturels (bois, colline, ...) ; la structure de la station participe aussi à la lutte contre le bruit.

L'implantation d'un bâtiment peut lui permettre de faire écran et de "casser" au maximum la directivité, du bruit d'un équipement, vers les endroits sensibles. De plus, les équipements bruyants doivent être regroupés et disposés loin des locaux occupés, en particulier de la salle de contrôle.

Les ouvrages peuvent être entourés de buttes de terre ou de murs.

Enfermer ou abriter

L'extinction du bruit à la source se traduit par

- capotage des gros motoréducteurs (vis d'Archimède, turbines d'aération), ou des machines complètes dans le cas de production d'air,
- capotage des gerbes de turbines,
- capotage complet des vis d'Archimède,
- fermeture des postes de relèvement,
- couverture des ouvrages.

Cette règle entraîne parfois une sujétion d'exploitation inacceptable. Il faut alors empêcher ou contrôler la propagation du bruit.

La construction de bâtiments est la meilleure solution. Pour les machines tournantes, comme surpresseurs ou compresseurs d'air, le bâtiment doit être le plus enterré possible ou traité spécifiquement. Des équipements bruyants, tels que ceux du prétraitement, sont avantageusement inclus dans un bâtiment.

La construction de galeries techniques pour les tuyauteries est particulièrement efficace, notamment pour la circulation d'air surpressé.

. **Utiliser l'effet de masse**

Chaque fois que, par unité de surface, le poids d'une paroi double, le niveau sonore baisse de 6 dBA. Prévoir

- des murs épais pour les bâtiments,
- des matériaux d'isolement à forte densité,
- des écrans de terre ou de sable,
- des épaisseurs élevées de revêtement isolant favorisant l'absorption d'énergie sonore,
- des socles importants pour la fixation des machines tournantes.

. **Adopter une vitesse lente**

Le niveau de bruit est plus faible à basse vitesse qu'à vitesse élevée et les fréquences produites sont moins mal perçues par l'oreille humaine

- utiliser des moteurs à basse vitesse de rotation, dans la mesure du possible,
- calculer le diamètre des conduites d'air pour des vitesses < 12 m.s-1,
- limiter les vitesses aux entrées et sorties d'air en augmentant la section des ouvertures.

. Adapter la protection acoustique

L'emploi de techniques particulières se généralise:

- mettre en place des silencieux à l'aspiration et au refoulement d'air,
- adapter les techniques de construction des bâtiments (porte spéciale antibruit, vitrage acoustique, ...),
- désolidariser les machines bruyantes du sol et des structures du bâtiment (plots antivibratils),
- désolidariser les conduites d'aspiration et de refoulement d'air (manchettes souples).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.5.3. Les aérosols

Ils sont créés par la pulvérisation ou la projection de l'eau dans l'air et, dans une moindre mesure, par l'agitation des surfaces liquides. Dans une station d'ERU, ils peuvent être à l'origine d'une certaine contamination bactérienne. Les sources principales d'émission sont

- les dispositifs d'aération: prétraitement, BA, lits bactériens (ventilation forcée) et également réacteurs à lits granulaires,
- les dispositifs de pulvérisation: rabattement de mousses, lavage de toiles filtrantes de traitement de boues, arrosage des pelouses en eau épurée, etc.),
- les chutes ou mouvements d'eau avec impact violent: pompage par vis d'Archimède, projection des organes de dégrillage, déversoirs, dépotage de matières de vidange, etc.

La plupart du temps, les bassins d'aération ne constituent pas la source d'émission la plus importante (s'il n'y a pas de rabattement de mousses) et la diffusion par air surpressé est moins polluante que l'aération mécanique. La taille de la plus grande partie des particules est supérieure à 5 um. On caractérise fréquemment l'intensité des aérosols par le nombre de "particules viables" au m^3 (de 200 pour les zones non contaminées à 10 000 pour les zones contaminées). La concentration en germes totaux dans les aérosols varie suivant les points d'une station d'environ 10^2 à 10^7 par ml, la concentration en coliformes thermotolérants étant environ 100 fois plus faible. Les concentrations varient très rapidement en s'éloignant du lieu d'émission.

Les enquêtes épidémiologiques sur le personnel d'exploitation ne révèlent pas de pathologie notable attribuable aux germes présents dans les effluents et les boues. Si l'on veut réduire le dégagement d'aérosols à l'extérieur, la solution efficace est celle du capotage (ex.: turbine d'aération) ou de l'installation dans une enceinte fermée: sans compter bien entendu les dispositions à prendre pour modifier ou supprimer les sources émettrices elles-mêmes.

D'autres nuisances, liées à des conditions locales particulières, peuvent être engendrées par les stations d'épuration. Tel est le cas de la pollution aviaire. Les stations attirent naturellement les oiseaux détritivores (mouettes, ...). Des dispositions assez simples (fils tendus, mise sous tension...) permettent de réduire les souillures sur les ouvrages, mais la concentration en volatiles peut présenter un risque dans certains cas de voisinage (piste d'atterrissage d'aéronefs...).

6.6. STATIONS A POPULATION VARIABLE

Un certain nombre de stations de villes ou d'installations touristiques balnéaires ou de sports d'hiver, sont soumises à de fortes variations de charge saisonnières, à caractère plus ou moins brutal. Les amplitudes de variation peuvent être de 1 à 2 pour une ville où le tourisme représente une activité importante mais non unique, et atteindre des valeurs beaucoup plus élevées (jusqu'à près de 50) pour des localités à vocation exclusive de loisir; le cas extrême est celui des terrains de camping fermés hors saison.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

En général, à ce problème de variations brutales, s'ajoutent des difficultés liées à l'environnement (manque de place, localisation urbaine sensible, conditions climatiques, capacité du milieu récepteur).

En fonction de ces données, deux principales orientations sont possibles:

- un traitement par boues activées avec traitement primaire plus ou moins poussé pour les installations
- à variation de charge progressive,
- à objectif de qualité élevée (DBO_5, azote),
- disposant de surface importante,
- un traitement physico-chimique sur décanteur lamellaire suivi éventuelle ment d'un traitement biologique par cultures fixées sur lits granulaires pour les installa
- à variations de charge très importantes et brutales,
- à objectif de qualité moindre,
- disposant de peu de place,
- devant être couvertes.

En pratique, du fait de réalisation par étapes, ces deux solutions sont souvent combinées.

6.6.1. Installation du type "boues activées"

Les installations fonctionnant à moyenne charge à débit maximal, admettent des variations de charge progressive assez importantes. En effet, si la charge volumique DBO5 de bassin est de 0,25 kg/m3.j, le fonctionnement de celui-ci est encore œrrect avec une charge cinq fois supérieure.

Si l'à-coup est plus important il est possible d'envisager la mise en œuvre d'une décantation primaire, avec apport éventuel de réactifs. Sans réactif, la variation admissible peut alors atteindre le rapport 1 à 7 ; avec réactifs on peut envisager un rapport de 1 à 10 sachant qu'il y a alors lieu de surdimensionner la clarification pour tenir compte du floc plus léger (absence de MES dans l'eau à épurer biologiquement).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 895. Installation des DEUX-ALPES (Isère). Capacité: de 1500 à 15000 habitants. Traitement des ERU par boues activées.

Pour le traitement et l'évacuation des boues, on doit tenir compte de la variation de la quantité et du taux de stabilisation des boues.

6.6.2. Installation de type `physico-chimique" avec biofiltration

C'est la solution la mieux adaptée aux stations de montagne ou balnéaires, soumises à des variations de charge brutales, et situées dans un environnement imposant une couverture des ouvrages.

Le traitement physico-chimique élimine, à lui seul, jusqu'à 95 % de la pollution décantable ; la décantation lamellaire permet de réduire le volume des ouvrages. Un traitement biologique de la pollution carbonée (voire azotée) sur BIOFOR répond également à ce besoin de réduction des surfaces (voir page 1288).

Hors saison, compte - tenu de la sous charge, le traitement physico-chimique peut être allégé, voire annulé.

En ce qui concerne les boues, elles sont, en saison comme hors saison, non stabilisées; leur traitement doit être conçu en conséquence.

6.6.3. Installation mixte

Cette solution associe une station d'épuration biologique à une station de type physico-chimique fonctionnant en parallèle. Cette dernière est principalement destinée à répondre aux variations saisonnières. La station biologique fonctionne à charge relativement constante et reste en service toute l'année. La station physico-chimique est aussi utile lors des opérations d'entretien de la station biologique. Tel est le cas de la station de SAINT-PALAIS pour le SIVOM et la presqu'île d'ARVERT (figure 897).

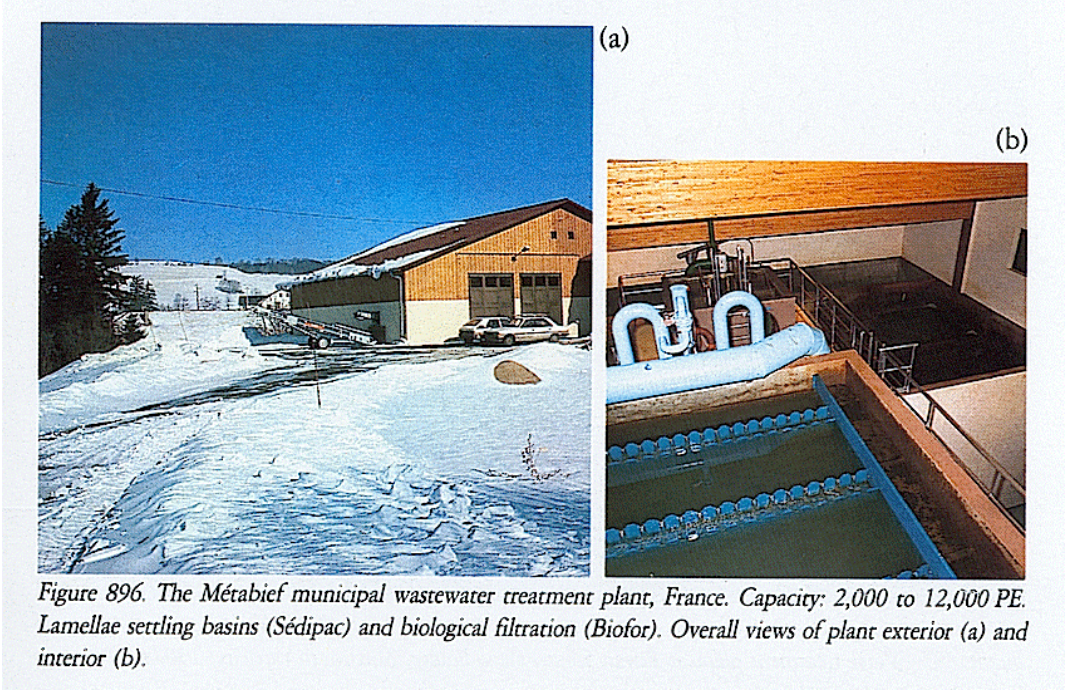


Figure 896. The Métabief municipal wastewater treatment plant, France. Capacity: 2,000 to 12,000 PE. Lamellae settling basins (Sédipac) and biological filtration (Biofor). Overall views of plant exterior (a) and interior (b).

Figure 896. Installation de MÉTABIEF (Doubs). Débit: 2 000 à 12 000 $m^3 j^{-1}$. Traitement des ERU par décantation lamellaire (SÉDIPAC et biofiltration (BIOFOR)). Vue générale extérieur (a) et intérieur (b).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

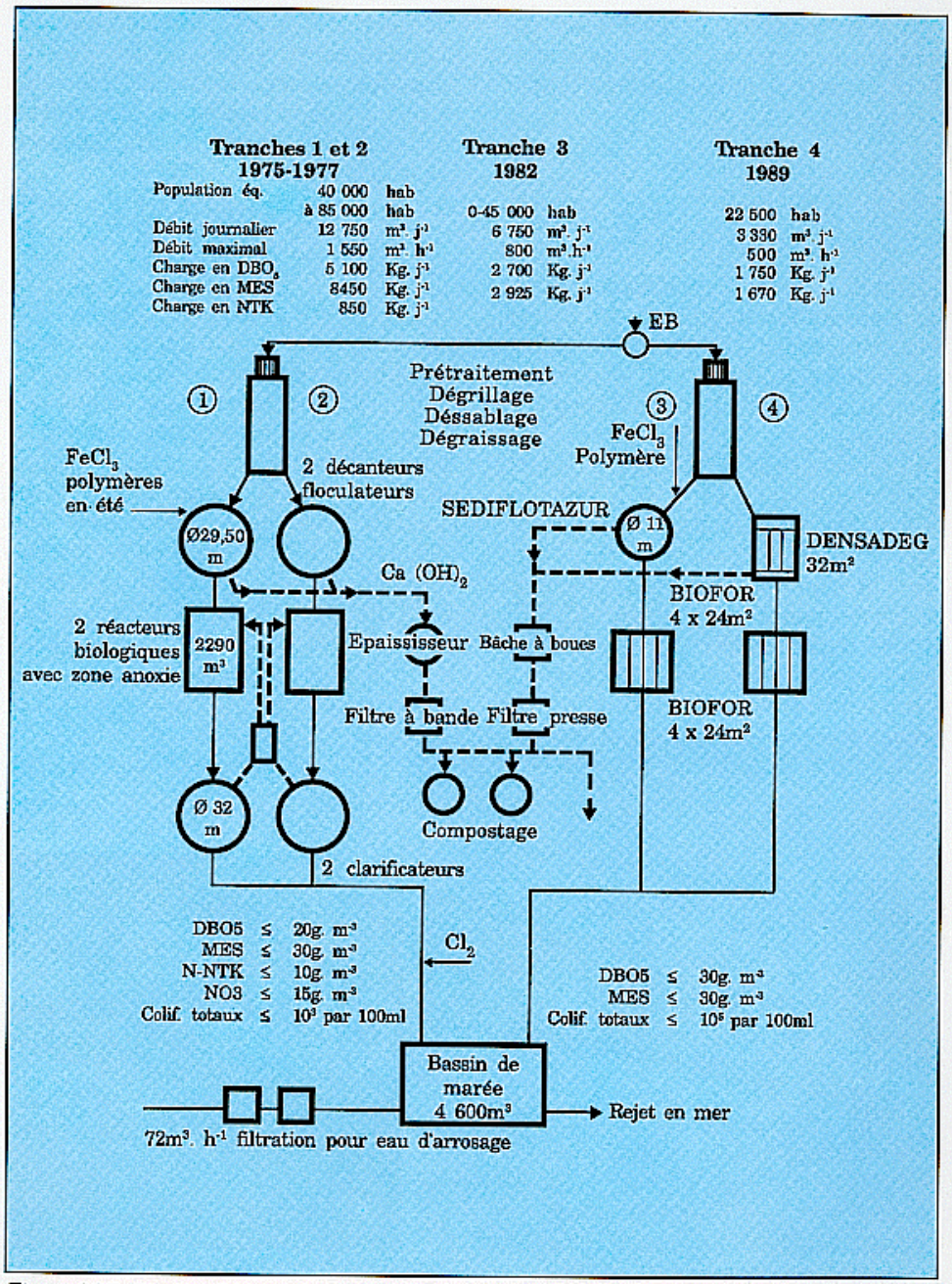


Figure 897. Station d'épuration de ROYAN SAINT-PALAIS (Charente-Maritime). Capacité maximale : 150 000 hab.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.7. RÉHABILITATION - RÉNOVATION

Dans les pays industrialisés, le parc des stations d'épuration "vieillit" d'autant plus qu'il se trouve dans un environnement qui évolue rapidement: conditions de rejet, urbanisation, exigences de confort, obsolescence des techniques.

On peut distinguer trois axes principaux d'action

- la modernisation des équipements et de l'exploitation,
- l'amélioration des performances globales de l'installation,
- l'adéquation du traitement des boues aux possibilités réelles d'évacuation.

6.7.1. Modernisation

Quelques possibilités de modernisation sont données à titre indicatif

- Modifications techniques: **pour améliorer le fonctionnement d'un ouvrage**. Il peut s'agir
  - d'un prétraitement
    . dégrillage automatique, voire adjonction d'un tamisage,
    . brassage -aération du dessableur par pompes aératrices pour une meilleure séparation des graisses,
    .conditionnement des sous produits, compactage des refus de dégrillage, essorage des "sables°, incinération des graisses,
  - d'un clarificateur : remplacement du pont racleur par un pont suceur,
- Modifications techniques **dans un souci d'économie**. Il peut s'agir
  - de remplacer les dispositifs d'oxygénation pour de meilleurs rendements (fines bulles en lieu et place de grosses bulles),
  - dans les bassins à faible charge, de dissocier la fonction brassage de la fonction aération,
  - d'asservir les moyens d'oxygénation à des mesures d'oxygène au moyen d'automates (économie de 10 à 20 %),.
- Adjonctions techniques pour cause **d'environnement.** Il peut s'agir de
  - couvrir les gerbes des aérateurs de surface pour limiter le bruit et les aérosols,
  - remplacer les aérateurs de surface par une oxygénation à l'air supressé, -couvrir des ouvrages tels que le prétraitement, les puits à boues, les épaississeurs; les mettre en dépression et traiter l'air vicié pour lutter contre les nuisances olfactives,
- Adjonctions techniques **dans un souci de fiabilité**. Il peut s'agir de:
  - mise en place d'un système de télésurveillance permettant de connaître à distance ce qui se passe sur un site, et d'intervenir d'une manière efficace et rationnelle,
  - mise en place de capteurs tels que sonde à oxygène et/ou de rH, mesures de concentration (liqueur et boues secondaires), suivi de voile de boues, débitmétries, dont les signaux, traités par automate, agissent sur les systèmes d'oxygénation et d'extraction de boue en excès, et de recyclage,
  - installation d'un système GTC pour une meilleure gestion tant du procédé que de la maintenance,
  - mise à disposition de logiciel d'assistance à l'exploitation (MAO, système ou intelligence artificielle).

6.7.2. Amélioration des performances

Les normes de rejet évoluent, les capacités des milieux récepteurs sont mieux

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

connues, les qualités de l'effluent plus fréquemment contrôlées, les coûts mieux connus, les performances des stations d'épuration s'analysent.

Tout ces paramètres peuvent conduire à revoir l'objectif de qualité et à procéder à une revalorisation ("upgrading").

Il peut s'agir d'un "détarage" en débit de l'installation existante, qui souvent va de pair avec une extension, ou bien d'une adjonction au traitement qui peut être

- filtration sur sable pour améliorer la teneur en MES,
- filtration biologique pour réduire les concentrations en DBO_5 et MES (BIOFOR ou BIODROF),
- adjonction d'une zone anoxie dans le cas d'un traitement par BA à faible charge, pour dénitrifier,
- filtration biologique pour nitrifier (tout en réduisant les teneurs en MES et DBO5 - déphosphatation simultanée,
- déphosphatation tertiaire (avec clarification ou sur filtre) pour réduire simultanément P et MES.

6.7.3. Adéquation du traitement des boues aux possibilités d'évacuation

Les conditions d'évacuation des boues deviennent de plus en plus sévères. Les décharges se ferment. La valorisation agricole est soumise à des plans d'épandage et à des contraintes d'exploitation. La réhabilitation des stations doit prendre en compte les **possibilités réelles d'évacuation.** Elle doit inclure les études et les équipements la rendant possible en permanence. On peut citer par exemple

- **Utilisation en agriculture**

a) pour des boues d'aération prolongée

- épaississement dynamique des boues (GDE) permettant de stocker des boues épaisses et réduisant les quantités d'eau à évacuer dans un rapport de 1 à 3 voire 1 à 4,
- déshydratation sur filtre à bandes ou centrifugeuse,

b) pour des boues mixtes fraîches

- flottation des boues biologiques, -digestion des boues,
- égouttage dynamique ou déshydratation mécanique.

Dans le cas où l'on recherche un produit à plus forte valeur commerciale (compost, granulé...), les équipements complémentaires suivants peuvent être envisagés

filtres-presses, sécheurs, granulateurs, ateliers de compostage.

- **Mise en décharge**

Dans le cas de mise en décharge, la siccité est un facteur primordial. Outre les équipements qui permettent de réduire le poids de MS et le volume de boue épaissie, les équipements peuvent inclure les dispositifs permettant de produire des gâteaux de siccité suffisante tels que

- filtres à bandes ou centrifugeuses suivis de post-chaulage ou de compostage, - filtres-presses.
- **Incinération** seule ou combinée avec les OM.

La siccité est, là aussi, capitale. A cet effet, les bonnes performances de l'épaississement sont très importantes, et l'épaississement séparé des boues activées, par flottation, est recommandé.

Les équipements à prévoir pour la déshydratation sont généralement

- des filtres-presses,
- des filtres à bande ou centrifugeuses, suivis de séchage ou compostage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

25
TRAITEMENT ET CONDITIONNEMENT DES EAUX INDUSTRIELLES

1. EAUX DE CHAUDIÈRES

1.1. TRAITEMENT DES EAUX D'APPOINT

1.1.1. Postes de décarbonatation et d'adoucissement

Les eaux d'appoint de chaudières doivent au minimum subir un traitement par échangeurs d'ions, de façon à être ramenées à un TH aussi voisin que possible de zéro.

Aux très basses pressions, on utilise encore parfois l'adoucissement simple (échangeur de cations régénéré au chlorure de sodium) tandis qu'aux pressions élevées on utilise exclusivement la déminéralisation. Aux pressions intermédiaires, décarbonatation, désiliciage éventuel et adoucissement sont combinés selon différentes méthodes. Les principales sont: - la décarbonatation à la chaux, à froid, avec désiliciage facultatif par le chlorure ferrique et l'aluminate, suivie d'adoucissement (voir pages 146 et 149),

- la décarbonatation à la chaux avec dé siliciage à la magnésie, à chaud (95 à 110 °C), suivie d'adoucissement (peu utilisée aujourd'hui),

- la décarbonatation sur échangeur decations carboxylique (voir page 236) sui vie d'adoucissement et comportant l'élimination physique du CO_2.

Pour permettre de choisir entre ces divers systèmes, le tableau 96 présente les résultats qu'on peut attendre de chacun d'eux.

Tous les procédés doivent être suivis d'une élimination physique (dégazage) ou chimique de l'oxygène et d'un conditionnement.

Les figures 898 et 899 donnent des exemples d'installation.

1.1.2. Chaînes de déminéralisation totale

Lorsque les procédés précédents ne donnent pas une qualité suffisante, il faut recourir à la déminéralisation totale des eaux d'appoint.

Suivant la composition de l'eau d'appoint, la pression et le type de chaudière, on est conduit à adopter l'un des schémas du tableau 97.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

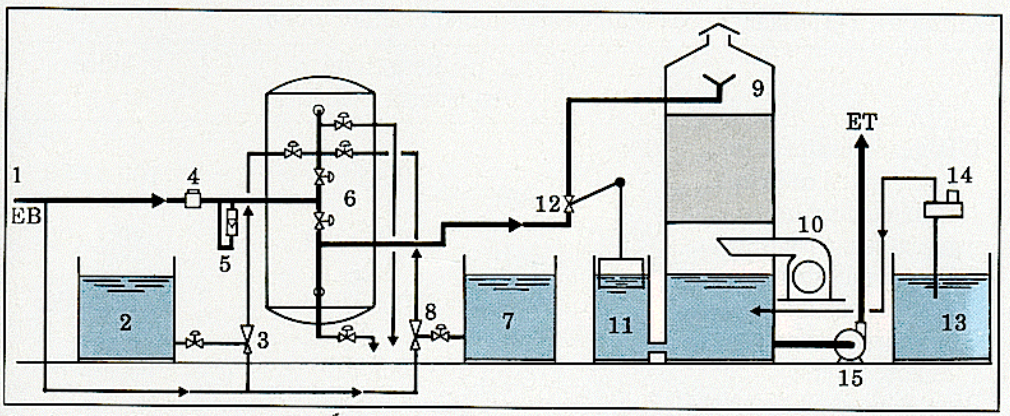
Tableau 96. Résultats à attendre des procédés de décarbonatation et d'adoucissement

	TA °F	**TAC (moyen) °F**	**Salinité totale °F**	**pH**	**Si0 mg.l^{-1} en**
Épuration FeCl3 + chaux à froid + adoucissement	0,5 à 2	2 à 4	ST - TAC + 3 à 6	8,5 à 10	inchangée
Épuration précédente + aluminate de sodium	id.	id.	id.	8,5 à 10	2 à 5
Épuration chaux + magnésie à chaud + adoucissement	1 à 1,5	2 à 2,5	ST - TAC + 2 à 2 5	8 5 à 10	1 à 2
Carboxylique + adoucissement avec élimination CO2 intermédiaire	0	1 à 3 sans correction de pH	ST - TAC + 1 à 3	6à7 sans correc-fion	
		2 à 5 avec correction de pH	ST - TAC + 2 à 5 avec correc-fion de pH	7,5 à 8,5 avec correc-tion	inchangée

ST: salinité de l'eau brute (exprimée en °F).
TAC: TAC de l'eau brute (exprimée en °F).

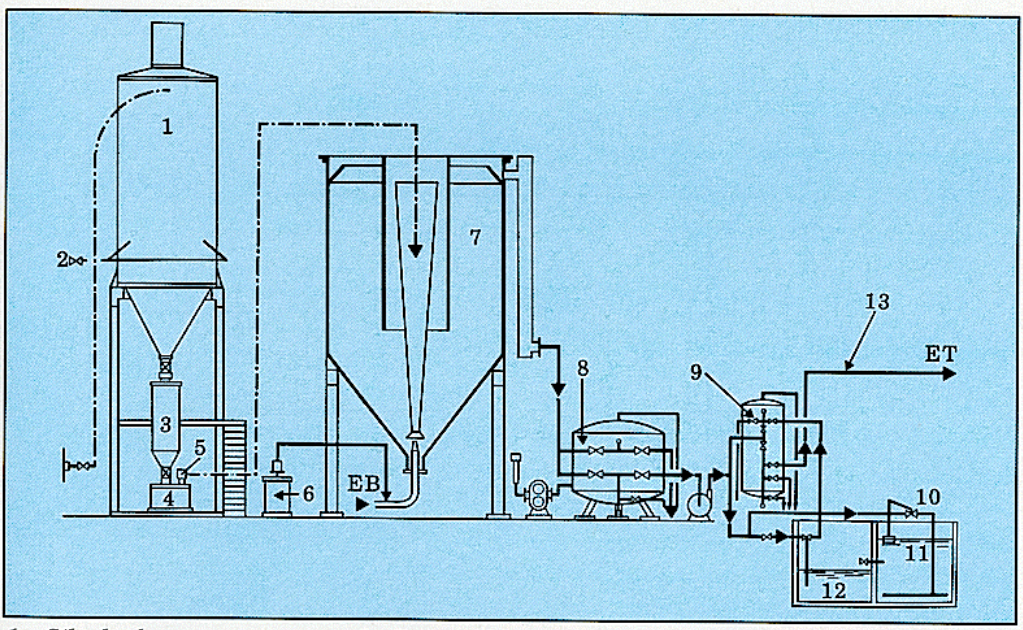
Si, avec les valeurs minimales du TAC, le rapport $\frac{SiO_2}{TAC}$ requis n'est pas atteint, il faut apporter les corrections nécessaires pour rétablir un rapport convenable entre la silice et l'alcalinité dans l'eau de la chaudière.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Arrivée d'eau brute.
2 - Bac de saumure.
3 - Injecteur de saumure.
4 - Compteur.
5 - Débitmètre.
6 - Échangeur à lit stratifié.
7 - Bac d'acide.
8 - Injecteur d'acide.
9 - Éliminateur CO_2.
10 - Ventilateur.
11 - Bac de prise de niveau.
12 - Vanne régulatrice de niveau.
13 - Bac de soude.
14 - Pompe doseuse de correction de pH.
15 - Pompe de reprise d'eau traitée.

Figure 898. Décarbonatation à froid et adoucissement combinés sur lit stratifié carboxylique-sulfonique.



1 - Silo de chaux.
2 - Système de dévoûtage.
3 - Doseur de chaux.
4 - Bac de délayage de chaux.
5 - Pompe de lait de chaux.
6 - Dosage de coagulant.
7 - Décanteur CIRCULATOR.
8 - Filtre.
9 - Adoucisseur.
10 - Appoint d'eau.
11 - Stockage de sel.
12 - Saumure.
13 - Départ eau décarbonatée et adoucie.

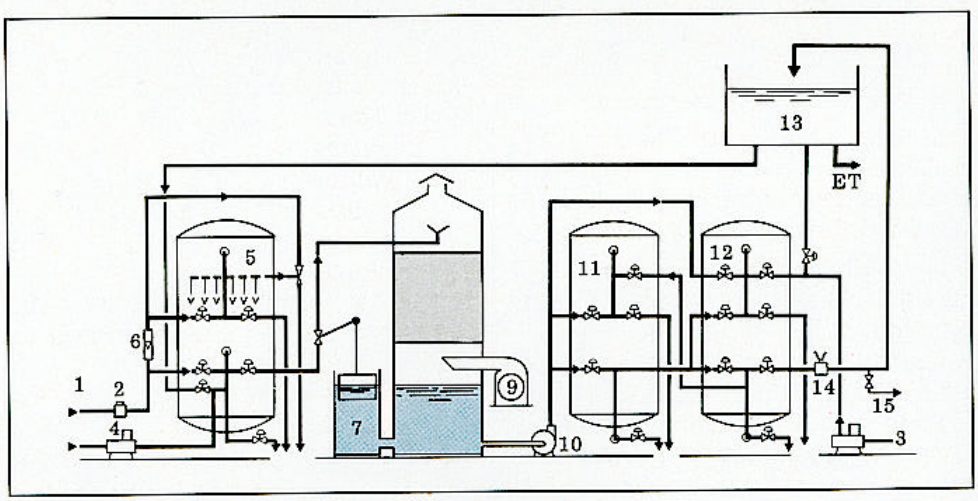
Figure 899. Décarbonatation à la chaux à froid et adoucissement sur résine.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Tableau 97. Performances des chaînes de déminéralisation totale.

	Résistivité en milliers d'ohms.cm	Silice en $\mu g.l^{-1}$
1. Déminéralisation primaire régénération co-courant	10 à 1000	100 à 500
2. Déminéralisation primaire régénération contre-courant (UFD...))	500 à 2 000	20 à 100
3. Déminéralisation primaire système continu	500 à 2 000	20 à 100
4. Déminéralisation par osmose inverse	10 à 300	100 à 2 000
Déminéralisation primaire (1, 2, 3) suivie d'un cation de finition	500 à 3 000	20 à 500
Déminéralisation primaire (1, 2, 3, 4) suivie d'un lit mélangé ou d'une chaîne de finition	5 000 à 20 000	5 à 30

Toutes ces valeurs sont données à titre indicatif. Elles peuvent être hors de portée quand on part d'eaux très minéralisées, polluées ou ayant subi un prétraitement insuffisant



1 - Arrivée d'eau brute.
2 - Compteur.
3 - Pompe doseuse de soude.
4 - Pompe doseuse d'acide.
5 - Échangeur de cations régénéré à contre-courant.
6 - Débitmètre.
7 - Bac de prise de niveau.
8 - Éliminateur de CO_2.
9 - Ventilateur.
10 - Pompe de reprise.
11 - Échangeur Af.
12 - Échangeur AF.
13 - Bac d'eau déminéralisée.
14 - Mesure de résistivité.
15 - Prise d'échantillon vers silicemètre.

Figure 900. Schéma de déminéralisation primaire.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 901. Installation de LA MADELAINE (Nord) pour Rhône-Poulenc. Débit: 3 X 80 $m^3.h^{-1}$. Chaire cation UFD + anion UFD.

Le schéma de la figure 900 montre une installation comportant un seul échangeur de cations et une combinaison d'échangeurs d'anions faiblement et fortement basiques.

Pour l'alimentation des chaudières HP, une installation type de déminéralisation peut inclure

- un traitement préalable: clarification ou décarbonatation,
- une chaîne primaire d'échangeurs d'ions comprenant obligatoirement un CF et un AF, et éventuellement un Cf (carboxylique) et un Af,
- une chaire secondaire comportant soit un CF et un AF, soit un LM, soit un seul cation de finition,
- un conditionnement

Le schéma de la figure 902 représente une installation de déminéralisation totale pour centrale nucléaire à partir d'eau décarbonatée comportant une chaire complète cation-anion régénérée à contre-courant et un LM de finition.

Un autre exemple particulièrement original de traitement faisant appel à des technologies avancées est illustré par le poste de la centrale de Mannheim en RFA, débit 210 $m^3.h^{-1}$ (figure 903).

1.1.3. Postes de dégazage

Pour l'élimination de l'oxygène et de l'eau d'appoint, le dégazage peut être réalisé soit par voie physique en mettant en oeuvre des dégazeurs sous vide ou des dégazeurs thermiques (chapitre 16), soit par voie chimique en utilisant des réducteurs d'oxygène (finition) ou des résines catalytiques.

L'élimination du gaz carbonique est toujours réalisée par voie physique.

Les dégazeurs thermiques sont de loin les plus répandus ; en général, leur température de fonctionnement varie de 105 °C à 140 °C et la capacité des bâches est calculée pour 15 à 60 min de stockage au débit nominal.

Les condensats exempts d'oxygène sont envoyés directement dans la bâche de stockage tandis que les condensats pollués (O_2) doivent être dégazés avec l'eau d'appoint

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

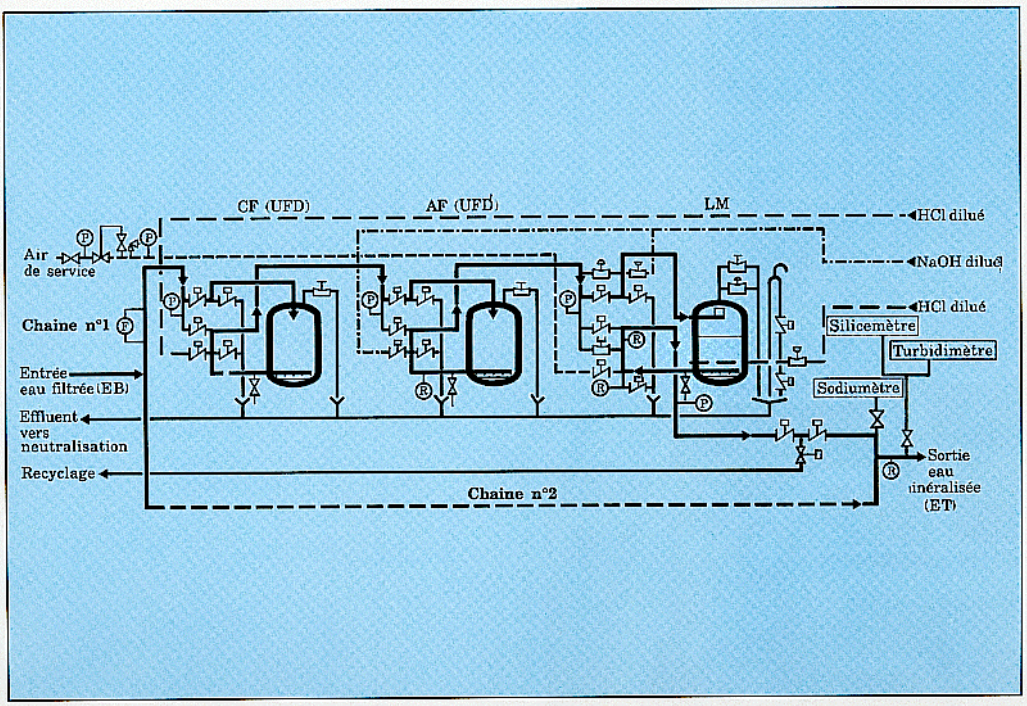
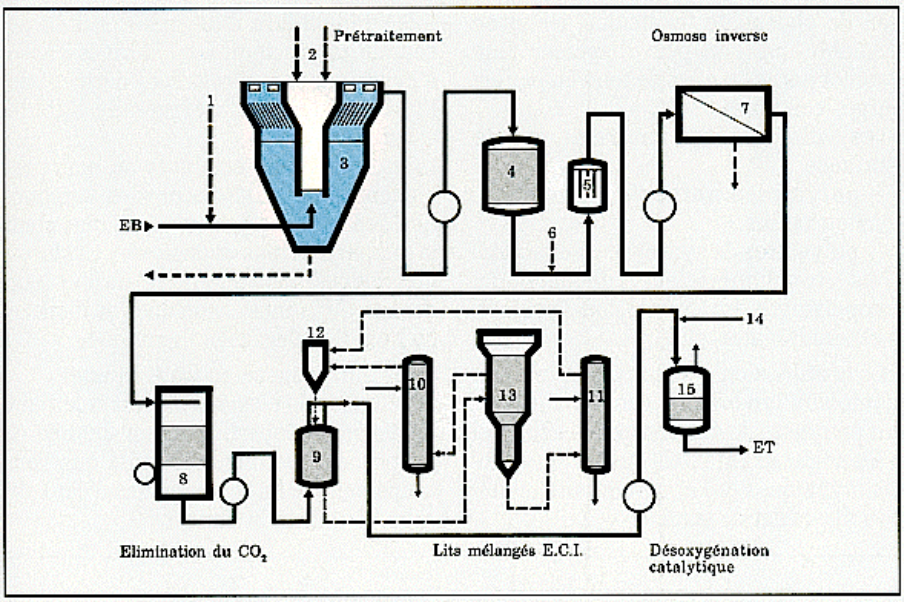


Figure 902. Schéma de déminéralisation avec chaînes primaires et lits mélangés de finition.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 - Injection de coagulant.
2 - Injections de chaux et de polymère.
3 - Décanteur lamellaire SEDIPAC.
4 - Filtre à sable.
5 - Filtre à cartouche.
6 - Dosage HCl.
7 - Osmose inverse.
8 - Éliminateur de CO_2.
9 - Colonne de fixation ECI par LM.
10 - Colonne de régénération anionique.
11 - Colonne de régénération cationique.
12 - Trémie de stockage résines.
13 - Colonne de séparation.
14 - Injection d'hydrogène.
15 - Colonne de désoxygénation sur résine.

Figure 903. Schéma du traitement de la centrale de MANNHEIM (RFA).

1.2. CONDITIONNEMENT DES EAUX DE CHAUDIÈRES

Le traitement et le conditionnement de l'eau doivent répondre aux trois objectifs prioritaires suivants

- maintien de l'échange thermique,
- protection contre la corrosion,
- qualité de la vapeur produite.

Les postes de traitement de l'eau assurent l'épuration et le dégazage de l'eau d'appoint ou de l'eau alimentaire. Le conditionnement est **le complément indispensable** dans le programme de traitement et comporte l'introduction rationnelle de produits de conditionnement au moyen de groupes de dosage.

Parmi les procédés les plus utilisés, on peut citer:

- **les phosphates - dispersants, polyphosphates - dispersants.**

Associés à l'alcalinité de l'eau de chaudière, ils neutralisent la dureté par forma

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tion de phosphate tricalcique, composé insoluble que l'on peut disperser puis évacuer par les purges de fond ou par les purges continues.

- **les dispersants naturels et de synthèse**
- **polymères naturels**: lignosulfonates, tanins,
- **polymères de synthèse**: polyacrylates, copolymère acrylate-maléfique, copolymère styrène-maléfique, polystyrène-sulfonates, etc.

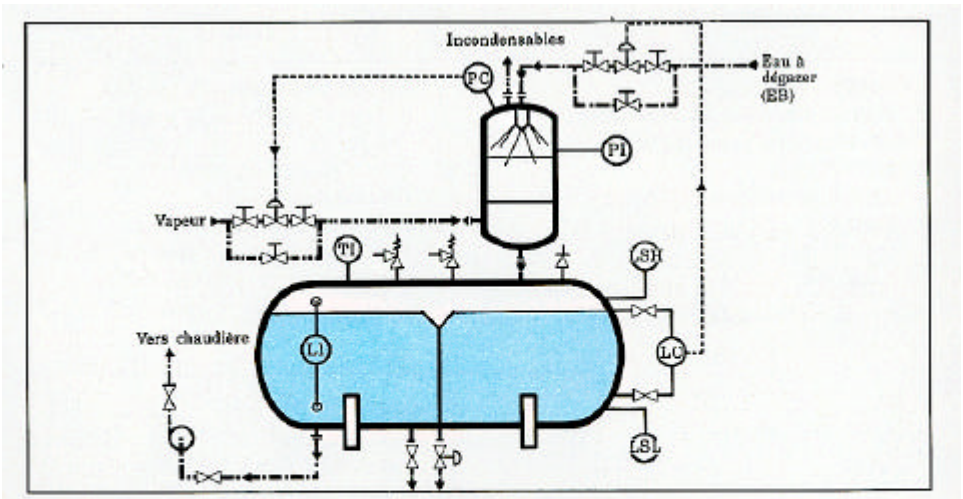
Leur utilisation, ou leur incorporation, ajoute aux produits de conditionnement des propriétés de dispersion très efficaces.

- **les séquestrants**: tels que les phosphores organiques qui apportent une inhibition avec effet de seuil.
- **les réducteurs d'oxygène**: sulfite de sodium, tanins, hydrazine, dérivés à base d'hydroquinone/pyrogallol, dérivés de' l'hydroxylamine, dérivés de l'acide ascorbique, etc.

Ces réducteurs, catalysés ou non, permettent la réduction des oxydes, la réduction de l'oxygène dissous ainsi que, pour la plupart, la passivation des surfaces métalliques. Leur choix, et surtout leur dosage, diffèrent suivant que l'on dispose ou non d'un dégazage thermique.

- **les anti-mousse ou anti-primage**

Mélanges de tensio - actifs qui modifient les tensions superficielles du liquide et suppriment les mousses ainsi que l'entraînement de fines gouttelettes d'eaux de chaudière dans la vapeur.



PI - Manomètre.
PC - Régulateur de pression.
TI - Thermomètre.
LI - Indicateur de niveau.
LSH - Alarme niveau haut.
LSL - Alarme niveau bas.
LC - Régulateur de niveau.

Figure 904. Schéma standard d'un poste de dégazage thermique, type garnissage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. CONDENSATS

On distingue:

- les condensats de chaudière HP, neutres, qui exigent en général un traitement d'épuration et toujours un conditionnement.
- les condensats BP, alcalins, qui nécessitent toujours un conditionnement, et un traitement seulement lorsqu'ils sont susceptibles d'être pollués.

Le traitement des condensats répond aux problèmes suivants :

- élimination des produits de corrosion des circuits vapeur - condensats,
- élimination de la minéralisation due aux entrées d'eau brute par les fuites au condenseur,
- élimination des polluants organiques provenant des échangeurs de procédé (condensat de réchauffage de l'industrie pétrolière).

2.1. CONDENSATS H.P.

2.1.1. Traitement

La définition du traitement des condensats dépend

- de la qualité des condensats,
- des normes imposées par les constructeurs,
- des exigences des exploitants.

Plusieurs solutions peuvent être proposées; elles allient la filtration et la déminéralisation. Elles ont donc comme composants essentiels: des filtres, des échangeurs d'ions, seuls ou en combinaison.

2.1.1.1. Filtration sur filtres à bouffies avec ou sans précouche (voir pages 182 et 788).

Les vitesses de filtration adoptées varient généralement entre 5 et 10 $m.h^{-1}$.

On utilise

. des fibres de cellulose ayant une longueur de 40 à 100 µm. Les filtres retiennent toutes les impuretés en suspension et spécifiquement les oxydes métalliques jusqu'à une dimension moyenne de l'ordre de 0,5 µm.

Le produit filtrant commence à relâcher des impuretés solubles à partir d'une température de 60 °C et se décompose au-delà de 85 °C. L'incidence de pH alcalins est similaire.

. des résines synthétiques non polaires en poudre qui présentent, par rapport à la cellulose, l'avantage de posséder un pouvoir adsorbant vis-à-vis des colloïdes et de résister à des températures voisines de 100 °C.

. des diatomées: en cas d'eaux huileuses, il est préférable de substituer à la cellulose ou aux résines des diatomées à haute porosité qui ajoutent à l'effet filtrant un effet adsorbant spécifique. La température optimale pour le déshuilage, variable suivant la nature des huiles à retenir, est comprise entre 40 et 80 °C.

Dans le cas d'eaux condensées contenant peu d'hydrocarbures aromatiques, qui sont solubles dans l'eau, le nourrissement doit être fait en charbon actif plutôt qu'en diatomées, et la température ne doit pas dépasser 50 °C.

Les vitesses de filtration des eaux huileuses doivent être adaptées à chaque problème et sont beaucoup plus faibles que celles des condensats ne contenant que des produits de corrosion.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Après la période de démarrage il est aussi possible d'employer sans précouche des **supports bobinés** jetables.

2.1.1.2. Déminéralisation à très brande vitesse de filtration (80-120 $m.h^{-1}$) directement sur lit mélangé cation - anion.

Ces appareils ont pour but de fixer les ions fer, cuivre, nickel, la silice, et d'arrêter les sels apportés dans les condensats par une entrée accidentelle d'eau brute au condenseur.

Ces lits mélangés ont aussi un effet filtrant dont le rendement est variable entre 50 et 90 %, selon la grosseur des particules et le régime de marche. Les colloïdes ne sont pratiquement pas arrêtés.

Pour résister à la perte de charge due à la fois à la vitesse élevée et au colmatage, les échangeurs d'ions doivent être particulièrement résistants: les résines macroporeuses sont les plus utilisées (voir page 229).

Le plus souvent, les résines sont lavées et régénérées dans un système extérieur aux colonnes de traitement; les transferts de résine se font par entraînement à l'eau. Ainsi est évitée toute possibilité d'introduction accidentelle, en chaudière, d'acide ou de soude lors d'une régénération (figure 906).

Les constructeurs de réacteurs nucléaires à eau sous pression imposent des exigences très sévères sur la teneur en sodium des eaux du circuit. Si la séparation des résines cationique et anionique d'un lit mélangé n'est pas totale avant la régénération, on constate un passage de sodium qui est préjudiciable, même en faible quantité.

Le lit mélangé n'est pas protégé par des unités de traitement amont et doit assurer seul l'élimination des diverses pollutions, c'est-à-dire, non seulement les sels dissous, mais aussi les MES (oxydes de fer principalement) et parfois, de très

Figure 905. Centrale thermique d'ALBERTA (Canada). Débit 2 X 540 $m^3.h^{-1}$. Poste de déminéralisation sur skid. Mixed-bed.

Downloaded from https://hydraulicsportal.blogspot.com/

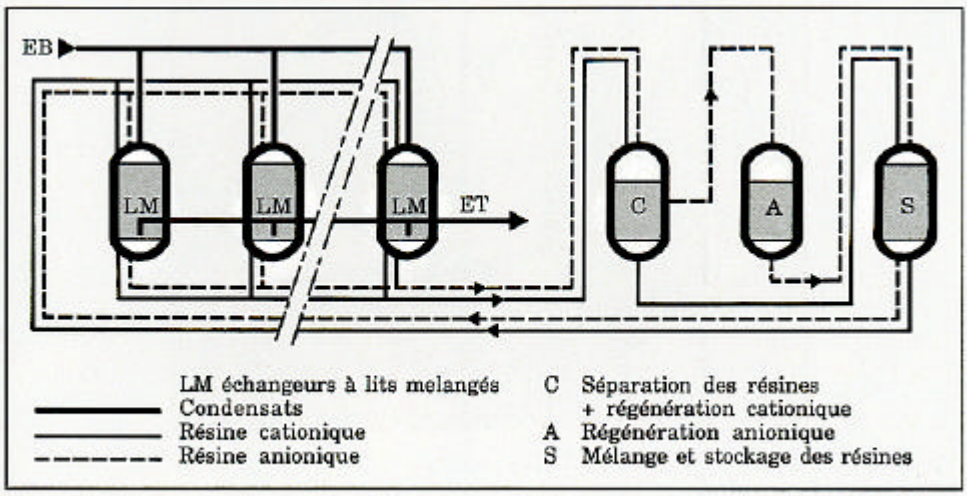


Figure 906. Poste de traitement de condensats avec régénération externe. Schéma de fonctionnement.

légères traces d'hydrocarbures. La salinité étant très faible, les cycles sont très longs. Les pollutions secondaires, même de concentration minime, s'accumulent en quantité suffisante pour perturber le classement des résines après transfert dans la colonne externe de régénération.

Certains des procédés utilisés, soit pour réduire les fuites ioniques dues à la "cross-contamination" (résines non régénérées par suite d'une mauvaise séparation avant régénération), soit pour améliorer leur séparation, font appel

- à des réactifs supplémentaires en quantités importantes (ammoniaque, chaux procédé CALEX -, soude),
- à des transferts de résines nombreux et relativement complexes.

Les solutions préconisées par DEGRÉMONT font appel au lit tricouche avec résine inerte intermédiaire. Ce système améliore nettement le classement des résines. Les caractéristiques en sont

- pas de risque de mélange de résines dans les colonnes de régénération,
- granulométrie appropriée des résines,
- nettoyage systématique de la résine à l'air et à l'eau pour éliminer les MES.

2.1.1.3. Déminéralisation à très brande vitesse comportant un échangeur de cations suivi d'un lit mélangé.

Lorsque l'eau condensée est conditionnée avec des quantités notables d'anions volatils (ammoniaque, morpholine ou cyclohexylamine) et que les entrées de salinité dues aux fuites d'eau brute sont négligeables, le lit mélangé est déséquilibré. Il y a en effet beaucoup plus de cations à retenir que d'anions autres que OH-.

Il est alors intéressant de faire précéder le lit mélangé d'un échangeur de cations qui élimine les ions NH^{4+} ou les amines et permet d'allonger considérablement le cycle de fonctionnement. L'échangeur de cations exerce en même temps un effet filtrant sur les produits de corrosion et permet de ne faire travailler le lit mélangé qu'en déminéralisation.

Ce système protège également le lit

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

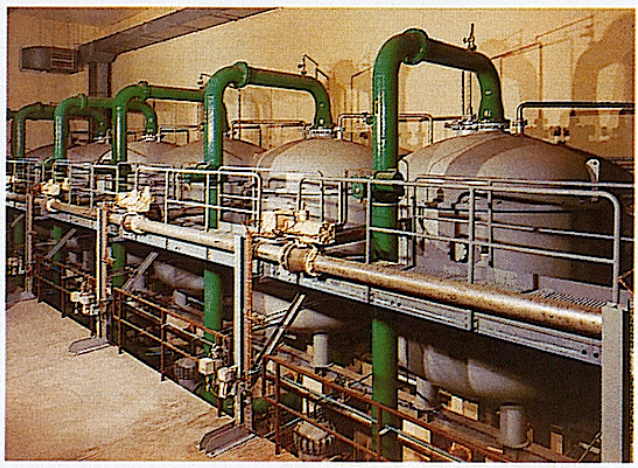


Figure 907. The Doël III nuclear power station in Belgium. Flow rate: 5,600 $m^3.h^{-1}$ Triobed for the treatment of condensates.

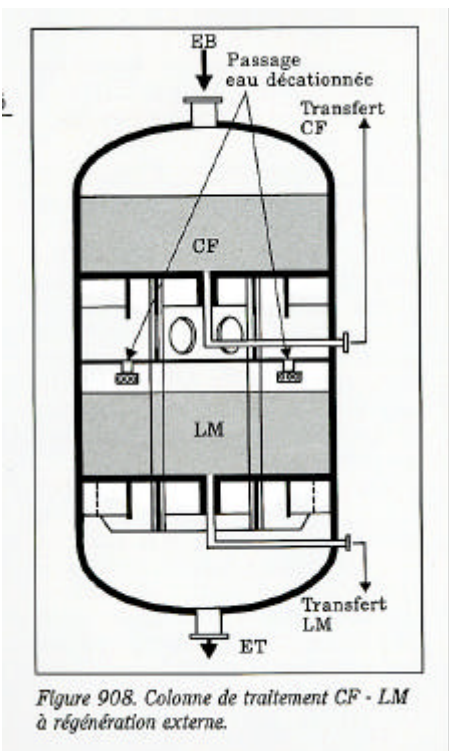


Figure 908. Colonne de traitement CF - LM à régénération externe.

mélangé des matières en suspension et traces d'huile ainsi que de l'ammoniaque présents dans le condensat brut.

Afin de réduire l'investissement lié à ce schéma, DEGRÉMONT place dans la même colonne de traitement un LM surmonté d'une couche de CF (figure 908).

Différentes solutions mettant en oeuvre dans une même colonne trois lits séparés de résine (CF, AF, CF de finition) sont également proposées. Elles présentent les inconvénients suivants

- complexité de construction de l'échangeur,
- risque d'acidification du condensat traité,
- risque de passage de fines de résines.

2.1.1.4. Filtration et déminéralisation associées dans un seul appareil par utilisation de microrésines sur les filtres à précouche. Ce dispositif (figure 910) répond à la

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

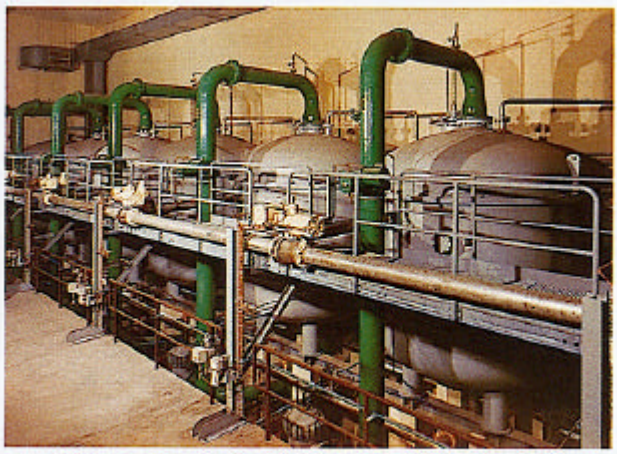


Figure 907. The Doël III nuclear power station in Belgium. Flow rate: 5,600 $m^3 h^{-1}$ Triobed for the treatment of condensates.

fois aux deux impératifs précédents avec un investissement réduit mais des frais d'exploitation très nettement plus élevés, les résines en poudre étant coûteuses et devant assez souvent être remplacées alors qu'elles n'ont que peu travaillé (soit par suite de leur colmatage physique par des impuretés en suspension, soit par passage d'une salinité anormale due à une fuite au condenseur).

La température limite d'utilisation de cette technique dépend de la résistance thermique des résines employées et de la nécessité éventuelle du désiliciage. Dans ce dernier cas, cette limite est de l'ordre de 40°C à 50°C.

Il faut noter que ce procédé donne une filtration d'une qualité exceptionnelle.

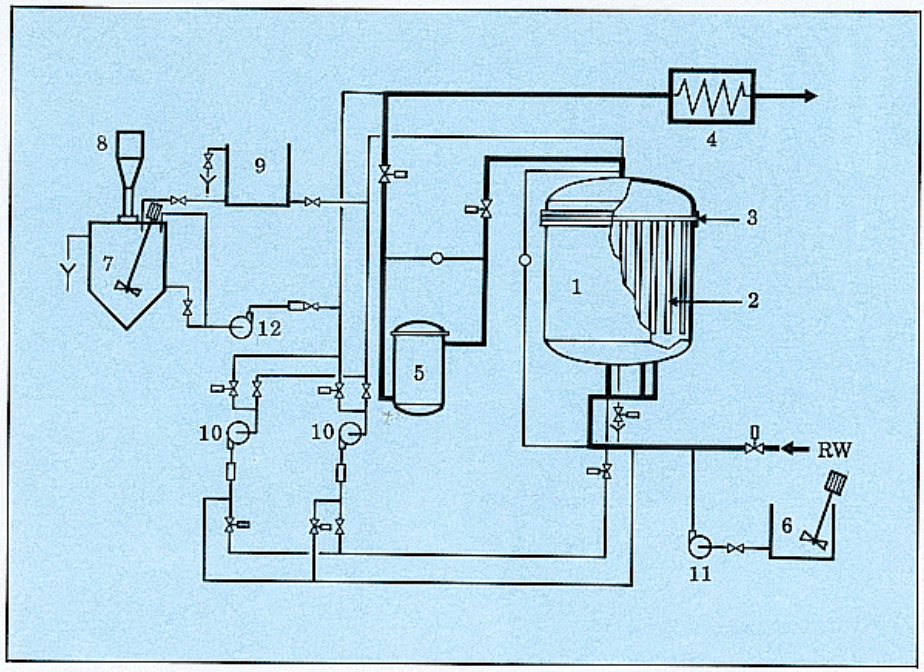
2.1.1.5. Filtration sur filtre électromagnétigue

Ce filtre est constitué par un empilement de billes d'acier contenues dans une enceinte verticale soumise à un champ électromagnétique extérieur. Travaillant à grande vitesse et facile à nettoyer, il permet de filtrer certains oxydes métalliques contenus dans les eaux condensées à des températures élevées et sans utilisation de produits d'empâtage. Ce procédé est relativement coûteux.

2.1.2. Conditionnement

Le conditionnement chimique des condensats HP est réalisable à partir d'ammoniaque ou de morpholine (voir page 55).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



RW - Condensate intake.
1 - Precoat filter.
2 - Candle filters.
3 - Candle holder.
4 - Heater.
5 - Resin trap.
6 - Feed tank.
7 - Precoat tank.
8 - Microresin injection system.
9 - Equalizing tank.
10 - Recirculation pumps.
11 - Feed pump.
12 - Preliminary layer injection pump.

Figure 910. Combined filtration and demineralization.

2.2. CONDENSATS BP

2.2.1. Conditionnement

La corrosion des lignes de condensats et de retours est essentiellement due à **l'acidité du milieu.**

A l'origine, le pH acide est lié au gaz carbonique libéré dans la vapeur par l'hydrolyse à chaud des carbonates et bicarbonates contenus dans l'eau.

On remédie à cet inconvénient par l'emploi d'amines volatiles, soit neutralisantes, soit filmantes, telles que cyclohexylamine, morpholine, DEA (diéthanolamine), AMP (acide amino-tri/méthylène phosphorique), octodecylamine, etc.

Dans la plupart des cas, il est conseillé d'utiliser un mélange d'amines et de réducteurs possédant des coefficients de vaporisation et de condensation différents, permettant de protéger efficace

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ment contre la corrosion des circuits courts et longs de l'installation thermique avec formation du filin protecteur Fe_3O_4.

Sont également utilisés, dans des cas précis, l'ammoniaque, le phosphate d'ammonium, les polyphosphates et pyrophosphates.

Ces produits de conditionnement sont récupérés puis recyclés en chaufferie par les retours de condensats ; ils permettent également la protection contre la corrosion des bâches et des lignes d'alimentation.

Introduits par pompe doseuse au droit de l'aspiration des pompes alimentaires, la majorité des inhibiteurs de corrosion précédemment cités assurent

- la neutralisation du CO_2 libre,
- le maintien d'un pH d'inhibition de 8,5 à 9.

Certains réducteurs volatils assurent la formation du filin protecteur Fe_3O..

Les amines filmantes isolent le métal de l'eau par la création d'une barrière monomoléculaire.

DEGRÉMONT possède et développe une gamme complète de produits de conditionnement, "COMPLEXES" et "KEMAZUR", associant les molécules les plus efficaces et permettant d'assurer la protection des installations.

2.2.2. Traitement

En l'absence de toute pollution, les condensats BP sont d'une qualité comparable à celle de l'eau distillée ou déminéralisée et disposent en outre d'un potentiel de calories récupérables.

Un aspect particulier des condensats BP est leur teneur totale en fer provenant en grande partie de l'arrachage des particules de métal par effet d'érosion ou de laminage (vitesse de la vapeur).

En fonction des recommandations pré

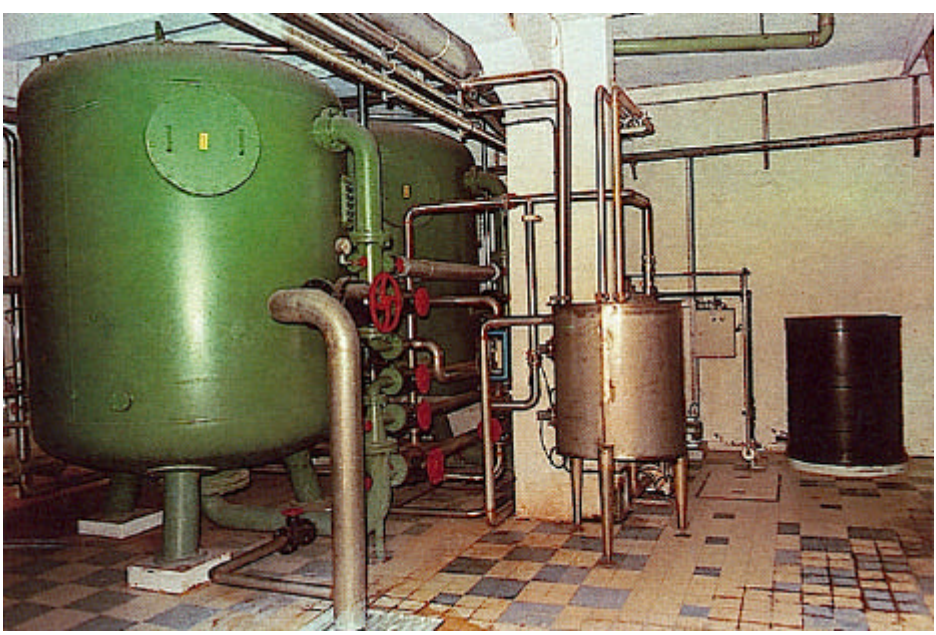


Figure 911. Installation de SAINT-MARTIN-DE-BELLEROCHE (Saône-et-Loiret. Débit: 20 $m^3.h^{-1}$. Traitement des eaux de condensat de laiterie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

conisées par le constructeur de la chaudière et par le traiteur d'eau, un traitement des condensats BP peut quelquefois être prévu.

Parmi les traitements éventuels

- l'élimination du fer par filtration lente et contrôlée sur bougies magnétiques à aimants permanents (filtre FERROSTOP), -l'adoucissement en température sur résines échangeuses d'ions.

Certains condensats, susceptibles d'avoir été pollués par le procédé, doivent subir un traitement spécifique

- **les condensats de réchauffage des stockages** en raffinerie. Selon la nature des hydrocarbures dispersés, l'épuration s'effectue par strippage à la vapeur et filtration sur précouche de charbon (hydrocarbures aromatiques) ou par coalescence (COLEXER) et filtration sur précouche de diatomées (hydrocarbures insolubles),

- **les condensats d'évaporation du lait** ou eau de vache, dont l'épuration s'effectue, après correction du pH, par une filtration biologique associée à une adsorption sur charbon et élimine l'acide lactique,

- **les condensats ammoniacaux d'évaporation** en sucrerie, dont la fraction recyclée en chaudière subit un strippage ou un dégazage thermique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. EAUX DE FABRICATION

3.1. PAPETERIES

Les chaînes de clarification d'eaux de surface ou de décarbonatation sont analogues à celles employées pour les eaux potables ou les eaux de chaudières, en particulier

- en clarification: PULSATOR ou SUPERPULSATOR et filtres AQUAZUR,
- en décarbonatation : DENSADEG ou TURBOCIRCULATOR et filtres AQUAZUR.

Le DENSADEG RL délivre des eaux très bien clarifiées qui peuvent, suivant les utilisations (papier emballage, réfrigération), ne pas justifier de filtration.

3.2. BRASSERIES ET FABRIQUES DE BOISSONS GAZEUSES

rencontrés comportent:

- la décarbonatation de l'eau de fabrication de la bière,
- la décarbonatation à la chaux et/ou l'adoucissement des eaux destinées à la préparation des limonades et des sodas,
- la décarbonatation partielle, suivie d'une désinfection par surchloration et d'une désodorisation par charbon actif des eaux destinées à la préparation des boissons du type Coca-Cola, Pepsi-Cola, etc.

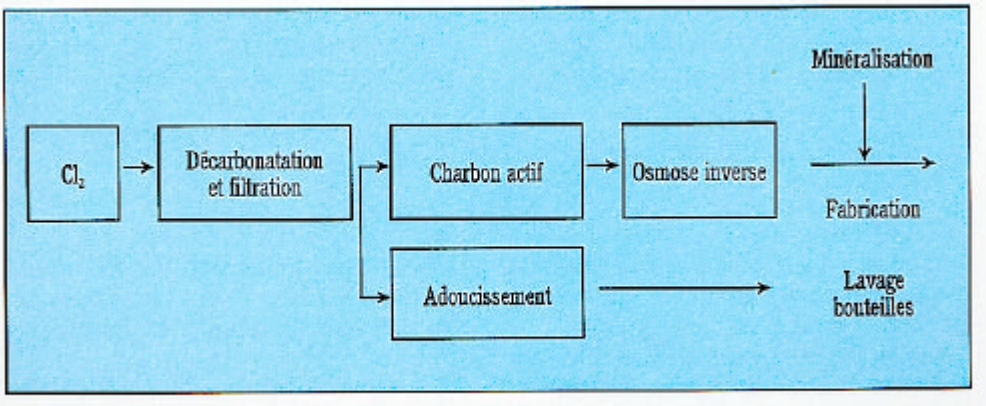
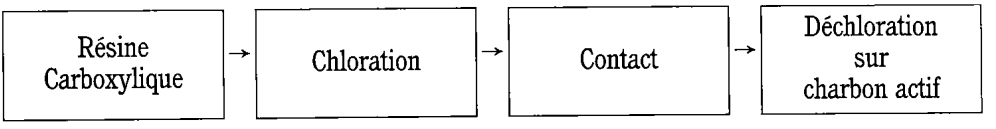


Figure 912. Préparation d'eau pour boissons gazeuses.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 913. Installation d'EAST MEMPHIS (USA) par JBAS. Débit: 50 $m^3.h^{-1}$. Préparation de boissons gazeuses.

Le schéma de la figure 912 inclut un tel poste, suivi quelquefois d'une filtration sécurité pour retenir d'éventuelles fines de Une décarbonatation par échangeur d'ions peut également être prévue dans la mesure où les résines cationiques nécessaires ont été agréées par l'État concerné. Le poste devient alors:



- la décarbonatation ou l'adoucissement des eaux utilisées au lavage des bouteilles dans ces diverses industries.

En cas d'eaux brutes très salines, ces procédés peuvent devenir insuffisants et doivent être combinés avec une déminéralisation par échange d'ions ou osmose inverse BP. Celle-ci peut aussi quelquefois présenter l'avantage d'éliminer des goûts.

Les eaux destinées au coupage des alcools sont déminéralisées.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3.3. TEXTILES ET TEINTURERIES

Les chaînes de traitement, de moyenne capacité, utilisent fréquemment dés eaux de forage et doivent satisfaire les besoins des chaudières. Elles peuvent être:

- décarbonatation sur résine carboxylique-adoucissement,
- décarbonatation à la chaux (GYRAZUR) -filtration-adoucissement

Des postes de déminéralisation ou d'osmose inverse peuvent être nécessaires pour le conditionnement d'air des salles de filature ou de tissage.

3.4. EAU ULTRAPURE

Cf. chapitre 15, page 845.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. PRODUCTION D'EAUX D'INJECTION EN RÉCUPÉRATION DU PÉTROLE

Pour une plate-forme offshore, une chaîne de traitement des eaux d'injection en récupération secondaire comporte en général (figure 914)

- une préchloration, à partir de NaCIO obtenu par électrolyse in situ de l'eau de mer,
- un tamisage fin (100 à 250 µm),
- une floculation en ligne (coagulant organique KEMAZUR),
- une filtration très rapide sur filtres compacts granulaires type FECM (sable) ou FECB (bicouche anthracite et sable) assurant 92 à 96 % d'élimination des particules de plus de 2 µm,
- un dégazage de l'eau, soit par dégazeur sous vide (dégazeur à 2 ou 3 étages), soit par strippage au gaz,
- une désoxygénation par bisulfite d'ammonium ou sulfite de sodium,
- un conditionnement bactéricide, -une filtration de sécurité.

Suivant les choix d'exploitation, la **filtration** peut se limiter quelquefois à un tamisage à 10 µm ou, au contraire, comporte une filtration sur bougies à précouche, avec nourrissement continu de diatomées. L'eau d'appoint des chaudières BP peut être obtenue par osmose

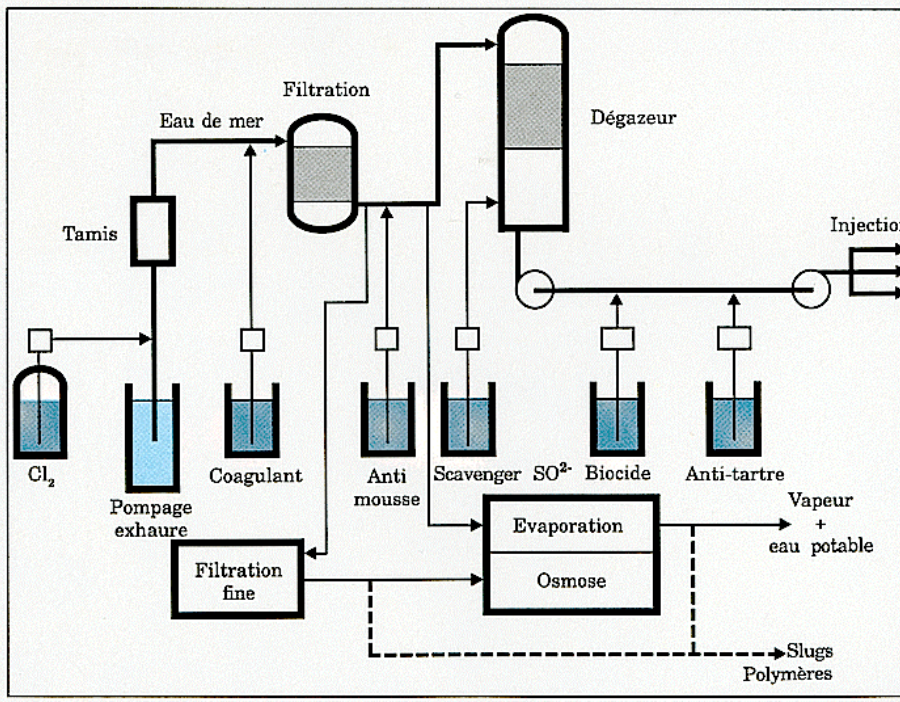


Figure 914. Traitements d'eaux de procédé offshore.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

inverse ou par distillation. A terre, le traitement de clarification peut être plus extensif et comporter un décanteur, d'autant que les eaux côtières et d'estuaires sont très chargées en limons.

Le **dégazage de l'oxygène** est assuré de deux façons :

- par strippage au gaz naturel quand celui-ci est disponible, s'il n'est pas acide et si la destruction des effluents gazeux en torchère est possible,
- par dégazage sous vide, à deux étages ou à trois étages. Son bon dimensionnement évite les surconsommations ultérieures d'un agent réducteur coûteux.

Figure 915. Installation d'UPPER-ZAKUM (Abu Dhabi). Débit: 6 000 $m^3.h^{-1}$. Filtration d'eau de mer.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. ÉPURATION DE SAUMURES

5.1. PRODUCTION DE SEL ÉPURÉ PAR RÉINSTALLATION DE SEL GEMME BRUT

- Clarification et dégazage des saumures brutes.
- Précipitation du Mg" par la chaux, et du Ca" par le carbonate de sodium, dans des réacteurs du type CIRCULATOR ou TURBOCIRCULATOR.
- Désulfatation partielle à la chaux ou au chlorure de calcium, avec recyclage des eaux-mères de cristallisation, dans des réacteurs du type DENSAPEG RP, à haute concentration en boues.

5.2. APPOINT A DES CIRCUITS ÉLECTROLYTIQUES DE FABRICATION DE SOUDE ET DE CHLORE

- Désulfatation partielle au carbonate de baryum ou au chlorure de baryum. - Précipitation du Mg^{2+} et du Ca^{2+} par la soude et le carbonate de sodium.

Ces traitements peuvent mettre en jeu des opérations intermédiaires de dégazage ou de rectification de pH; ils sont fréquemment suivis d'une filtration sur sable (par exemple sur filtres FV 2).

Les cellules à membrane, développant des densités de courant jusqu'à 7 000 $A.m^{-2}$, exigent des qualités plus sévères de traitement (figure 916)

- élimination des traces de Ca^{2+} sur des résines adoucissantes particulières (jusqu'à 50 $\mu g.l^{-1}$ Ca^{2+}),
- déchloration sous vide, éventuellement complétée par SO_3^{2-}
- - déchloration en dérivation.

5.3. PURIFICATION CONTINUE DE SAUMURES D'USINAGE ÉLECTROLYTIQUE

On cherche à limiter l'accroissement de la teneur en hydroxydes métalliques en traitant en dérivation une partie de la saumure sur centrifugeuse ou sur filtre à précouche.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

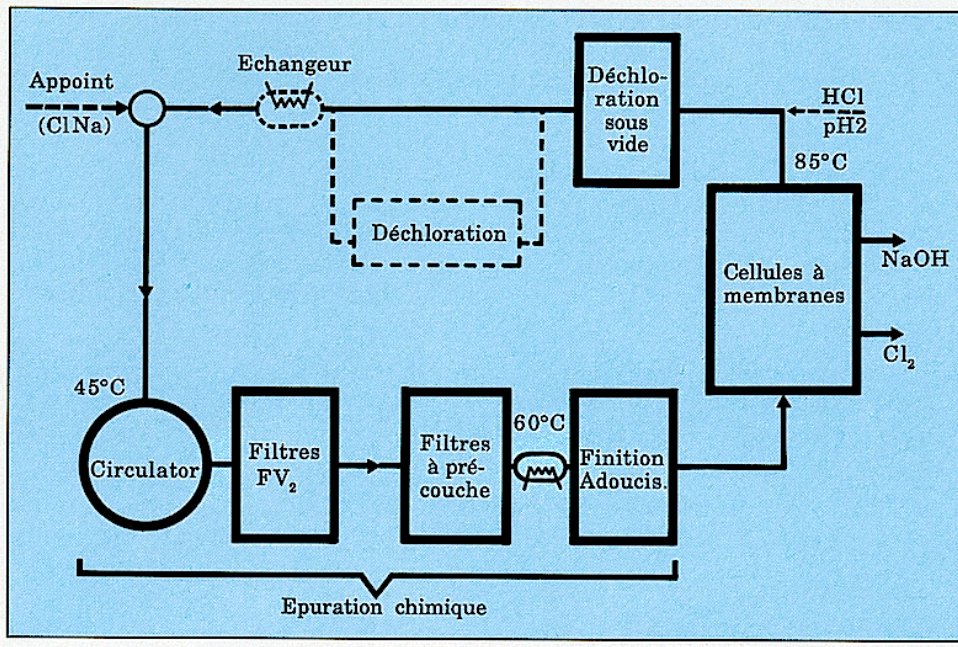


Figure 916. Schéma de fonctionnement de l'installation d'ARACRUZ (Brésil). Débit : 65 $m^3.h^{-1}$. Épuration chimique de saumure sur cellules à membranes.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 917. Vue générale de l'installation d'ARACRUZ (Brésil).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. EAUX DE REFROIDISSEMENT

L'exploitant d'un circuit de refroidissement est confronté à trois types de problèmes qui sont:

- les salissures et développements biologiques,
- l'entartrage,
- la corrosion

La figure 918 représente un circuit de refroidissement semi-ouvert avec les différents dispositifs de traitement et d'injection de produits de conditionnement.

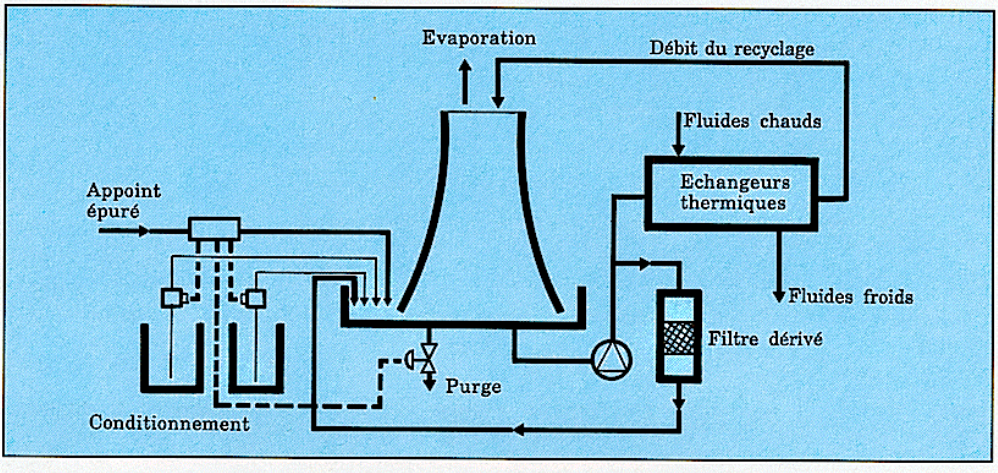


Figure 918. Schéma général d'un circuit de refroidissement semi-ouvert.

6.1 PROTECTION CONTRE LES SALISSURES ET LES DÉVELOPPEMENTS BIOLOGIQUES

(Voir chapitre 2, page 60).

L'action préventive est plus importante que l'action curative, ceci dans un triple but d'efficacité, d'écologie et de moindre coût.

Les matières colloïdales ont un rôle particulièrement nocif dans ce processus car elles coagulent sur les surfaces chaudes en créant un filin isolant qui sert de support et de nutriment aux développements biologiques.

6.1.1. Action sur l'eau d'appoint

Suivant son degré de pollution, il est fait appel à

- une clarification avec coagulation + filtration,
- une filtration avec coagulation sur filtre, - une oxydation éventuelle (NaClO, ...).

La décarbonatation par la chaux permet d'effectuer simultanément dans le

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

même décanteur une coagulation et une réduction de la salinité, ce qui est un premier avantage. De plus, elle a un effet direct sur la qualité biologique de l'eau et du circuit.

6.1.2. Action sur le circuit

Plusieurs moyens complémentaires sont possibles.

6.1.2.1. Filtration dérivée avec coagulation éventuelle sur filtre

La filtration d'une fraction du débit en circulation est fortement conseillée car elle permet de limiter le taux de MES dans le circuit à des valeurs réduites. Le débit prévu pour la filtration dérivée est de l'ordre de 5 à 10 % du débit d'eau recyclée. Bien entendu, si le circuit est sujet à des pollutions et exigences particulières (vents de sable, poussières de procédés...), le pourcentage peut être beaucoup plus élevé.

L'emploi de coagulants organiques est recommandé sur les eaux colmatantes.

6.1.2.2. Utilisation de dispersants organiques

Le rôle de ces produits est de maintenir en suspension les particules pour empêcher la formation de dépôts dans les zones de faible circulation et sur les parois d'échange. Ils peuvent aussi régulariser la formation des couches protectrices apportées par les inhibiteurs de corrosion auxquels ils sont souvent incorporés (voir page 155).

6.1.2.3. Utilisation de composés tensioactifs

Un abaissement de la tension superficielle est recherché pour favoriser l'accès et la pénétration des salissures par les biocides. Ces agents de surface peuvent être cationiques, anioniques, amphotères ou non ioniques. La longueur de la chaîne carbonée influe sur les propriétés détergentes.

Leur utilisation est particulièrement indiquée dans les cas suivants

Figure 919. Centrale nucléaire de LEIBSTADT (Suisse). Débit: 3 600 $m^3.h^{-1}$. Décarbonatation d'eau du Rhône.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- préparation du circuit (voir page 1377), - désinfection en association avec les biocides,
- nettoyage - dépollution (huiles, graisses, hydrocarbures...).

6.1.2.4. Utilisation du chlore et de dérivés du brome

Le réactif le plus couramment utilisé est NaOCl. Le chlore agit comme oxydant et biocide ainsi que comme coagulant.

Les consommations de $C1_2$ peuvent être très importantes car la libération des matières organiques retenues sur les surfaces peut accroître de 10 à 15 fois la demande initiale en chlore.

Les chlorations sont en général effectuées en discontinu à des fréquences très variables qui peuvent aller de trois fois par jour à quatre fois par an. On évite de dépasser 1 $mg.l^{-1}$ de Cl_2 libre résiduel dans les circuits, pour ne pas accélérer les phénomènes de corrosion.

Les dérivés bromés présentent l'avantage, par rapport au chlore, d'être plus actifs en pH basique et en milieu ammoniacal; leur mise en œuvre est parfois délicate.

6.1.2.5. Utilisation des biocides

La mise en œuvre d'un traitement préventif avec les moyens précédents permet souvent de limiter l'utilisation de biocides (algicides et bactéricides) et de les réserver principalement pour des actions de choc durant les périodes propices aux développements biologiques (printemps, automne) et lors de pollutions accidentelles.

a) **Actions des biocides**

Les composés chimiques utilisés dans le contrôle biologique des eaux des circuits de refroidissement agissent suivant deux modes principaux

. Action sur la **membrane** de la paroi cellulaire

- ammoniums quaternaires (produits cationiques) à effet tensio - actif,
- certains dérivés aminés,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 920. Installation d'UERDINGEN (RFA) pour BAYER. Débit: 350 $m^3.h^{-1}$. Filtration dérivée sur filtre sans vanne Æ 6, 7 m.

- phénols et chlorophénols (très toxiques pour les rejets, ils font (objet d'interdictions dans les circuits avec purges),
- certains composés aldéhydiques.

. Action sur le métabolisme de la cellule (inhibiteurs enzymatiques)
- composés organo-soufrés,
- certains dérivés aminés.

b) Mise en œuvre

. Le choix des biocides à mettre en œuvre doit tenir compte
- du pH de l'eau, facteur souvent important pour sa conservation et pour (obtention d'une efficacité maximale,
- de la compatibilité avec les additifs de traitement (ionicité, affinité chimique...), - des temps de résidence,
- des phénomènes d'accoutumance (surtout lorsque les injections sont fréquentes).

6.2. PROTECTION CONTRE LES RISQUES D'ENTARTRAGE ET DE CORROSION

Trois types de procédé sont pratiqués.

6.2.1. Procédé d' "équilibre naturel"

Ce procédé consiste à régler, conformément à (indice de RYZNAR (voir page 425), pH et TAC de l'eau en circulation, de façon à ce qu'elle soit à (équilibre. Ce réglage se fait par introduction de réactifs, acides ou alcalins, et par limitation du taux de concentration.
- sauvegarde des masses filtrantes par dépollutions fréquentes du sable,

. L'association des biocides et de la filtration dérivée permet une optimisation des deux procédés:
- nettoyage préliminaire des circuits avant mise en route.

Pour lutter contre le développement des micro-organismes, il faut d'abord
- connaître les causes directes ou indirectes de leur présence (contamination, nutriments, conception du circuit, exploitation),
- définir les moyens préventifs qu'il serait possible de mettre en œuvre,
- suivre rigoureusement et objectivement (évolution des micro-organismes, à (aide d'analyses fiables.

Cela suppose la mise en place d'un programme prenant en compte autant les effets directs recherchés que les incidences dans le temps et sur le milieu récep1371 teur. Ce programme ne peut être mené qu'en disposant de produits de conditionnement adaptés et d'une connaissance approfondie des procédés de traitement.

Ce procédé est séduisant par sa simplicité, mais il présente des limites importantes, en particulier
- il existe un équilibre de l'eau pour chaque température alors que, dans un circuit de refroidissement, la température de l'eau varie constamment,
- la concentration en sels dissous de l'eau en circulation doit être limitée, ce qui entraîne des purges importantes et donc de fortes consommations d'eau d'appoint,
- (eau se trouve en état d'équilibre instable: le seul passage au réfrigérant atmosphérique peut abaisser sensiblement le pH (absorption excessive de CO_2

La figure 921 indique le pH moyen qui s'établit en fonction du TAC de l'eau en

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

circulation d'un circuit semi-ouvert sur réfrigérant atmosphérique.

Ce procédé est encore appliqué dans des circuits de centrale fonctionnant pratiquement en circuit ouvert (très faible concentration) avec des écarts de température faibles et disposant de systèmes de nettoyage avec circulation de boules.

6.2.2. Procédés avec inhibiteurs d'entartrage

6.2.2.1. Principe

Ils constituent une amélioration du procédé précédent et s'adressent à des eaux à tendance entartrante. Ils consistent à introduire dans le circuit des produits chimiques qui retardent la précipitation du carbonate de calcium, notamment aux points chauds. On détermine alors les pH, TH et TAC de l'eau de telle sorte qu'elle soit à l'équilibre, voire même entartrante, pour les températures froides.

Les retardateurs utilisés, la plupart du temps en combinaison, sont les polyphosphates, phosphonates et surtout les polymères organiques à pouvoir dispersant renforcé.

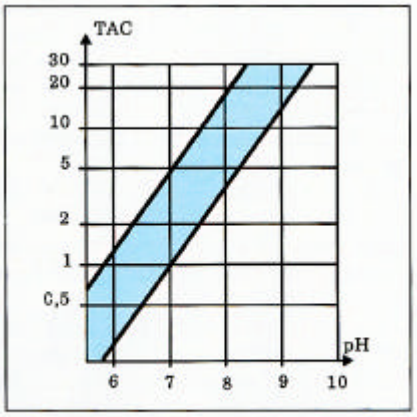


Figure 921. pH de l'eau de circulation des circuits de refroidissement.

Ces inhibiteurs d'entartrage élargissent la "plage d'équilibre" et donc le domaine de température où l'eau peut être considérée à l'équilibre, en autorisant un fonctionnement avec des indices de RYZNAR qui peuvent descendre jusqu'à 4 et parfois en-dessous.

6.2.2.2. Avantages et limites des procédés retardateurs de précipitation

Les procédés de stabilisation sont très recherchés dans la mesure où ils permettent de fonctionner à "pH libre". Cependant, il y a une relation directe entre le pH et le TAC (figure 921).

Les utilisations à **"pH libre"** limitent en réalité le TAC de l'eau en circulation entre 15 et 30 °F soit des pH de 8,5 à 9,3 avec des risques accrus de corrosion vers TAC 10 °F et d'entartrage vers TAC 40 °F. **Le taux de concentration s'en trouve lui aussi limité.**

Le recours à l'addition d'acide sulfurique ou chlorhydrique peut abaisser le TAC; mais alors, le pH n'est plus libre et le SAF est accru.

Les procédés de stabilisation avec inhibiteurs d'entartrage conduisent donc à un contrôle de la formation de la couche protectrice de carbonate de calcium. Mais le filin protecteur de carbonate de calcium peut être très sensible aux variations des paramètres du circuit (acidité, SAF, défaut de réactifs...).

Les risques de corrosion sont limités par le caractère entartrant et le pH de l'eau, mais le rôle du SAF est prépondérant**:** les chlorures et les sulfates accélèrent la dépassivation des filins protecteurs. D'une manière générale en régime entartrant contrôlé, on peut espérer des vitesses de corrosion sur l'acier :

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- inférieures à 100 µm par an si SAF < 50°F,
- inférieures à 150 µm par an si SAF < 75 °F.

6.2.2.3. Améliorations obtenues par l'apport d'inhibiteurs complémentaires

Pour réduire les vitesses de corrosion, des éléments complémentaires peuvent être incorporés dans les formulations antitartre.

. Zinc. Le Zn est un inhibiteur de corrosion cathodique. Aux doses usuelles d'antitartre et à des pH en général supérieurs à 8,5, la teneur en Zn du circuit reste inférieure à 1 $mg.l^{-1}$; la présence d'un dispersant a une incidence favorable sur la teneur en zinc. L'amélioration globale escomptée dans ces conditions est de 20 à 50 % sur la vitesse de corrosion, en particulier avec des eaux à SAF peu élevé. De plus, le zinc peut améliorer l'action de certains biocides.

.Inhibiteurs de corrosion du cuivre (dérivés azolés, voir page 428).

Ils sont particulièrement recommandés en présence de phosphonates car ces derniers peuvent accélérer l'attaque des métaux cuivreux.

. **Chromates.** Ils sont efficaces à des concentrations de quelques $mg.l^{-1}$, mais leur inconvénient est la toxicité des Cr(VI) qu'il faut transformer en Cr(III) dans la purge avant son rejet

6.2.3. Procédés avec inhibiteurs de corrosion

6.2.3.1. Principe

Il consiste

- à supprimer les risques d'entartrage en abaissant le pH de l'eau au voisinage de 7 (pH contrôlé) ou en supprimant la dureté (adoucissement ou déminéralisation),
- à introduire simultanément dans le circuit un inhibiteur qui s'oppose à la corrosion par formation d'un film protecteur adhérent, homogène, non poreux, et ne

perturbant pas l'échange thermique.

La plupart des inhibiteurs de corrosion en circuits semi-ouverts sont de type composite, avec protection anodique et cathodique (voir page 427 et tableau 98) et des doses en circuit de quelques dizaines de $mg.l^{-1}$.

Tableau 98 - Propriétés comparées des quatre principales familles d'inhibiteurs de corrosion pour circuit semi-ouvert (sur réfrigérant atmosphérique)

	Chromate zinc + dispersant	**Polyphosphate zinc + dispersant**	**Phosphonate zinc + dispersant**	**Phosphates +dispersants + inhibiteurs organiques**
Gamme pH	6,4 - 6,8	6,4 - 7,5	6,5 - 8	6,8 - 7,5
Temps de résidence (h)	> 100	env. 50	env. 70	> 100
Efficacité	Excellente	Très bonne	Bonne	Excellente
Vitesse de corrosion gin par an	< 50	< 60	< 100	< 50

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'un des éléments binaires le plus fréquemment rencontré est le zinc qui, pour rester ionisé au voisinage de la paroi, nécessite un pH dan l'eau du circuit voisin de la neutralité ou légèrement acide, suivant les formulations.

6.2.3.2. Obtention du pH optimal

Le TAC de l'eau d'appoint doit être réduit pour que le pH de l'eau du circuit se situe dans la plage voulue. Trois moyens peuvent être utilisés pour satisfaire à cette condition.

- Addition d'acide: mais elle entraîne un accroissement de la salinité.
- **Décarbonatation sur résine carboxylique:** elle permet de diminuer à la fois le TAC et le TH de l'eau et donc sa salinité.
- **-Décarbonatation à la chaux:** s'il y a nécessité de clarification.

6.2.3.3. Recherche du taux de concentration optimal

Pour économiser aussi bien l'eau que les produits de conditionnement, il y a intérêt à rechercher un taux de concentration aussi élevé que possible. Ce taux dépend:

- des conditions d'exploitation du circuit (chasse aux fuites parasites, etc.),
- des risques de précipitation des sels,
- du temps de résidence recommandé pour l'utilisation de l'inhibiteur choisi.

Si l'on utilise de l'acide sulfurique pour maintenir le pH, les teneurs atteintes en ions SO_4^{2-} obligent à limiter le taux de concentration pour ne pas dépasser le produit de solubilité du sulfate de calcium. Une décarbonatation préalable, qui élimine simultanément alcalinité et calcium, peut s'avérer très rentable en autorisant l'augmentation du taux de concentration.

Il est rare que la silice soit un facteur limitant, sauf dans certaines régions, comme l'Extrême-Orient, où les eaux d'appoint peuvent en contenir plusieurs dizaines de $mg.l^{-1}$.

Les taux de concentration recherchés sont de l'ordre de 3 à 6, mais il arrive, avec certains types d'épuration (appoint d'eau déminéralisée, épuration dérivée...) et de conditionnement, de pouvoir atteindre 8 ou plus, ce qui simplifie d'autant le problème des rejets.

6.2.4. Rejets

Très souvent, ces purges ne peuvent être totalement supprimées et se pose alors le problème de leur rejet.

Le rejet d'eaux chromatées est interdit, en général au-delà de 0,1 $g.m^{-3}$ en Cr(VI) ; mais on dispose de procédés industriels éprouvés pour détruire et éliminer ces chromates (voir page 260) ainsi que le zinc.

Les teneurs habituellement requises dans les circuits en P_2O_5 (< 20 $mg.l^{-1}$) et Zn (< 5 $mg.l^{-1}$) sont en général tolérées dans les rejets mais les normes sont en cours d'évolution.

6.3. CHOIX DES PROCÉDÉS COMMENT ÉTUDIER UN CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT

La composition chimique de l'eau n'est pas le seul facteur à prendre en considération pour l'étude d'un circuit de refroidissement, mais elle intervient de plusieurs manières. C'est pourquoi, dès le stade du projet, la consultation d'un spécialiste à la fois du traitement et du conditionnement des eaux présente de nombreux avantages

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- de nouveaux procédés éprouvés ont pu apparaître dont il serait dommage de ne pas profiter dans une usine neuve,
- un choix est parfois possible entre des eaux de deux ou plusieurs origines,
- le traitement de l'eau d'appoint peut être intégré harmonieusement au traitement général des eaux de l'usine,
- la qualité de l'eau disponible sur le site peut conduire à choisir un type d'appareil plus facile à protéger qu'un autre. Quand le renouvellement de l'eau en contact avec les surfaces à protéger est trop lent, il est quasi impossible de protéger les appareils par des interventions chimiques sur l'eau,
- le type de protection choisi intervient dans le choix des matériaux de construction: réfrigérants, pompes, canalisations de liaisons, etc.

6.3.1. Données de base

Ce sont:

- analyses des eaux et conception du circuit, -caractéristiques des appareils (vitesses de passage, matériaux, gradients de température, températures de "peau"...), - efficacité recherchée,
- contraintes d'exploitation
- possibilité ou non de concentrer,
- manipulation éventuelle de réactifs acides (H_2SO_4 ou HCL),
- contraintes de rejet,
- coût d'exploitation.

6.3.2. Bilans d'exploitation

On peut être amené à envisager plusieurs variantes et à établir des bilans d'exploitation pour comparer les différents procédés de protection. Ces bilans doivent prendre en compte, si possible, tous les éléments du coût d'exploitation, entre autres:

- consommation de produits,
- coût de l'eau qui est souvent le poste principal (plusieurs fois le coût des pro duits surtout s'il s'agit d'eau potable),
- main-d'œuvre pour le contrôle et l'entretien des équipements,
- montant des amortissements,
- réduction des frais de maintenance du **circuit** de refroidissement, et amélioration de la capacité de production.

De tels bilans permettent de mieux évaluer l'incidence d'une augmentation du taux de concentration qui, en réduisant le coût d'exploitation, entraîne la possibilité d'amortir rapidement les installations d'épuration (décarbonatation, filtration...).

6.4. RECHERCHES D'ÉCONOMIES D'EAU

6.4.1. Réutilisation d'eaux usées industrielles ou domestiques

Le recyclage d'eaux résiduaires épurées peut améliorer le bilan d'exploitation de l'usine ou être imposé par des ressources d'eau insuffisantes; exemple: cas des raffineries de pétrole.

6.4.2. Épuration dérivée

L'épuration chimique en dérivation du circuit peut être intéressante, sinon nécessaire

- si l'on veut maintenir des taux de concentration élevés (8 à 12),
- si une élimination importante de silice est recherchée : par décarbonatation avec chaux et soude on peut traiter un débit

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

d'eau bien inférieur à celui de l'appoint en bénéficiant des précipitations massives de carbonate et de silice.

Ce traitement dérivé ("sidestream treatment") a été relativement développé aux États-Unis dans le but de supprimer les purges ("zero blowdown"). Il peut être associé à un conditionnement inhibi teur de corrosion chromate-zinc (figure 922).

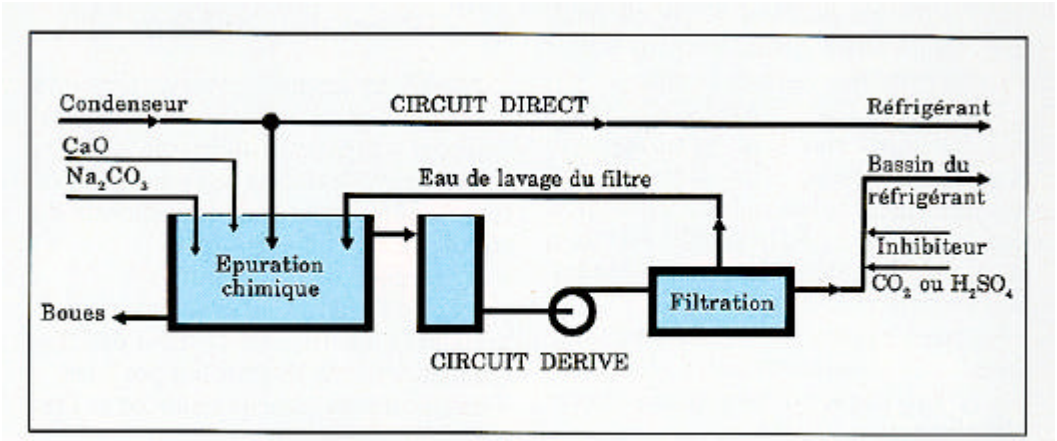


Figure 922. Schéma d'une épuration dérivée.

Figure 923. Raffinerie de TOSCO (USA). Débit: 37 m^3. h^{-1}. Épuration dérivée pour circuit de refroidissement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.5. CAS PARTICULIERS DES CIRCUITS OUVERTS (à un seul passage)

On ne bénéficie plus du phénomène de concentration qui permet de limiter les consommations en réactifs. Par contre, les temps de résidence sont en général faibles. Le tableau 99 donne les différents types de traitement que l'on peut être amené à mettre en œuvre.

Tableau 99. Proctection des circuits de réfrigération ouverts.

Désordre	Protection
- Salissures et - Développements biologiques	- Tamisage et/ou Clarification-Filtration Déferrisation (sur certaines eaux de forage) Dispersants Chloration Biocides (en discontinu)
- Entartrage - Corrosion	- Antitartres -Dispersants - Inhibiteurs de corrosion (ex: polyphosphate-zinc faible teneur) Ajustement du pH

6.6 CAS PARTICULIERS DES CIRCUITS FERMÉS

Le remplissage du circuit est effectué en eau "noble" adoucie ou déminéralisée.

Les principaux moyens de protection sont résumés dans le tableau 100.

Les inhibiteurs de corrosion doivent assurer une protection anodique totale et les concentrations à maintenir sont de l'ordre du gramme par litre. Les formulations doivent aussi être adaptées aux différents métaux du circuit, cuivre en particulier.

La réduction d'oxygène est mise en oeuvre sur des circuits chauds ou pour répondre à des exigences de résistivité. Les entrées d'oxygène sont maîtrisées par mise sous atmosphère d'azote.

De plus en plus souvent, on rencontre des circuits dits "fermés" mais qui, en fait, ont des pertes non négligeables, impliquant des appoints d'eau et des pollutions parasites.

Tableau100. Protection des circuits de réfrigération fermés.

Désordre	Protection
- Salissures	- Filtration dérivée Dispersants
- Développements biologiques	- Biocides (chocs)
- Tartre	- Adoucissement Déminéralisation
- Corrosion	- Inhibiteurs de corrosion, forte teneur (chromates, nitrites, phosphates, molybdates organiques) + sel tampon (borax) ou Réducteurs d'oxygène (sulfite, tannate, hydrazine,...) + relèvement de pH (amine, phosphate)

6.7. PRÉPARATION DES CIRCUITS

L'importance de la phase de démarrage est capitale: dès que l'acier est mis en contact avec l'eau, des phénomènes de corrosion irréversibles peuvent être initiés. Il faut donc pratiquer le conditionnement dès la mise en eau du circuit, en pré

Downloaded from https://hydraulicsnet.blogspot.com/

voyant les étapes suivantes de préparation:

- nettoyage avec des produits dispersants et détergents,
- formation de la couche protectrice avec des dosages renforcés d'inhibiteurs.

Cette couche doit être ensuite entretenue avec un groupe de dosage asservi au débit d'eau d'appoint.

6.8. CONTRÔLES

Il est indispensable d'effectuer des contrôles pour s'assurer de la bonne application et de l'efficacité du conditionnement. Ils portent principalement sur:

- consommations en eau et en réactifs,
- fonctionnement des postes d'épuration d'eau et d'injection de réactifs,
- analyses d'eau (appoint et circuit, en particulier: pH, TAC, Ca, Cl, teneur en inhibiteur),
- mesures de la corrosion: corrosivimètres, éprouvettes - tests, manchettestémoins,
- qualité de l'échange thermique avec mesure, si possible, du coefficient de transfert calorifique d'un échangeur du circuit pris comme témoin.

La qualité du conditionnement des eaux de refroidissement est essentielle aussi bien pour le rendement de l'unité de production que pour la tenue du circuit, en particulier durant les premières semaines de fonctionnement.

Une collaboration étroite entre l'utilisateur et le spécialiste de traitement des eaux est nécessaire.

DEGRÉMONT a mis au point et assure le développement de produits et de procédés (KEMAZUR et COMPLEXES) répondant à tous les problèmes de conditionnement.

6.9. CIRCUITS DE RÉFRIGÉRATION AVEC EAU DE MER

Ils concernent la réfrigération de condenseurs de centrales et de batteries d'échangeurs thermiques.

Les prises d'eau comprennent une grille et un tamisage mécanique de l'ordre de 4 mm. Ce tamisage a un rôle de protection mécanique indispensable, mais il contribue également à la protection contre la corrosion (Réduction des dépôts). Des précautions sont prises dans le choix des matériaux de construction, (voir page 447)

- volutes de pompe en béton ou en fonte émaillée et impulseurs en bronze ou acier inox 18.8.3,
- boite à eau en acier plastifié,
- collecteurs en béton, et circuits auxiliaires en acier protégé par anode soluble,
- grilles avec protection cathodique par potentiel imposé.

6.9.1. Circuits ouverts

Ils constituent le cas général des condenseurs des centrales de bord de mer et des navires.

La protection contre la corrosion est inutile sur des échangeurs en titane (cas des centrales nucléaires récentes). Dans le cas d'alliages cuivreux, surtout de laitons Amirauté, elle doit être assurée par

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

la formation d'un filin protecteur à base d'hydroxyde ferreux. Celui-ci est obtenu par la distribution d'environ 1 $mg.l^{-1}$ de Fe^{2+}, sous forme de sulfate heptahydrate, pendant 1 heure par jour et près de 300 jours par an.

La protection contre les dépôts (réduction de la corrosion) est adaptée surtout à la lutte contre les moules et nécessite un **traitement biocide** qui est assuré par distribution de chlore obtenu par électrolyse in-situ de l'eau de mer (dose résiduelle recherchée de 0,2 $mg.l^{-1}$ à la sortie des condenseurs).

La chloration est continue si l'eau de mer est à 30 °C et plus. Elle est discontinue pour les températures inférieures, avec par exemple une chloration de 15 min toutes les 6 heures et peut ne plus être pratiquée en-dessous de 12 °C.

Le nettoyage mécanique en ligne des condenseurs est aussi de plus en plus fréquent dans les centrales nucléaires. Il est assuré par la circulation de boules à pointes de zircon qui permettent aussi l'érosion du tartre carbonaté.

6.9.2. Circuits semi-ouverts

Bien que rares, ils sont quelquefois nécessaires et le facteur de concentration ne peut y dépasser 1,2 à 1,3. En plus des précautions définies pour les circuits ouverts, une vaccination acide réduisant le TAC doit être prévue sur l'eau d'appoint et l'emploi d'un conditionnement inhibiteur-dispersant est conseillé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

26
PROCESSUS INDUSTRIELS ET TRAITEMENT DES EFFLUENTS

1. CONCEPTION DES INSTALLATIONS

1.1. ORGANISATION DES ÉGOUTS ET DES CIRCUITS

Elle est étroitement liée à la nature des industries et les situations les plus diverses existent. Il est essentiel déviter les dilutions inutiles et les principes suivants doivent être respectés

- les eaux de réfrigération, si elles ne sont pas en circuit semi-ouvert, et les eaux pluviales non polluées sont rejetées en réseaux séparés,
- les eaux de procédé présentant des concentrations élevées ou des polluants spécifiques sont collectées séparément (eaux cyanurées, eaux chromatées, eaux salines, etc.),
- les eaux pluviales pouvant être polluées sont dirigées vers la station de traitement,
- les eaux contenant des matières valorisables et/ou recyclables sont prétraitées avant mélange avec les autres effluents contaminés.

Parallèlement, le flux hydraulique et le flux polluant, lorsqu'ils sont trop variables, sont régularisés par

- **des bassins d'orage**, placés en dérivation, qui stockent les premières eaux polluées. La reprise de ces eaux à faible débit, vers le traitement, permet ainsi de ne pas sur dimensionner celui-ci.
- **des bassins d'homogénéisation** brassés stockant, pendant quelques heures, sinon pendant quelques jours, la totalité des effluents produits par une unité ou par toute l'usine, écrêtent les pointes de pollution et permettent aussi une certaine programmation du fonctionnement de l'installation.
- **des bassins de sécurité**, maintenus vides et destinés à stocker pendant une ou deux journées l'effluent brut, dans le cas de caractéristiques anormales de celui-ci (toxicité), ou l'effluent en cours de traitement dans le cas d'arrêt d'un stade d'épuration situé en aval Ces deux fonctions peuvent être conjuguées en un seul bassin.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.2. TRAITEMENTS SÉPARÉS DIFFLUENTS

Ils consistent en l'épuration séparée d'effluents d'ateliers particuliers et se justifient -soit par une revalorisation de sous-produits (flottation en abattoirs, récupération de fibres en papeterie),

- soit par un moindre coût de l'épuration des effluents concentrés (désulfuration des soudes usées de raffinage),
- soit par une détoxication (chrome, solvants, sulfures) nécessaire avant épuration biologique,
- soit par l'optimisation du traitement biologique (méthanisation d'effluents concentrés en IAA).

1.3. TRAITEMENT PRÉLIMINAIRE

Les conditions de prétraitement des effluents généraux d'usine sont, elles aussi, variées

Le **dégrillage** automatique est souhaitable dans la plupart des industries et impératives dans certaines: IAA ou papeteries.

Le **dessablage** n'est réalisé que dans quelques industries (aciéries, laminoirs, fonderies, sucreries, sablières) et sur certaines eaux pluviales.

Le **dégraissage** est fréquent sur les effluents d'IAA et de laminage à froid.

Le **déshuilage** est souvent nécessaire les hydrocarbures et les huiles proviennent des circuits de graissage ou du stockage de combustible, et parfois des fabrications.

La **neutralisation**, quand elle n'est pas incluse dans le traitement physico-chimique, peut être indispensable avant épuration biologique.

Le **refroidissement** est quelquefois nécessaire pour protéger une épuration biologique ou satisfaire les normes de rejet: cokerie, pétrochimie, chimie, pâtes et papier.

1.4. TRAITEMENT PHYSICO-CHIMIQUE

L'épuration physico-chimique peut, suivant les cas, constituer un stade intermédiaire ou un stade final du traitement. Elle a une ou plusieurs fins

- précipitation de métaux et de sels toxiques ou indésirables (SO_4^{2-}, F^-...),
- élimination des huiles en émulsion,
- clarification avec réduction concomitante de la DBO_5 colloïdale et la DCO correspondante.

Le traitement physico-chimique suppose le maintien du pH dans une zone assez étroite. Suivant la nature du processus (précipitation, cristallisation, adsorption ou floculation), il peut être réalisé dans différents types de clarificateur

- décanteurs raclés,
- flottateurs, tels que FLOTAZUR ou SÉDIFLOTAZUR, pour l'élimination d'huiles, de fibres et pigments,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- décanteurs lamellaires tels que SEDIPAC, pour la précipitation d'hydroxydes,
- clarificateurs à recirculation de boues, tels que DENSADEG et TURBOCIR-CULATOR,
- filtres à matériau granulaire pour les eaux peu huileuses (raffineries, laminoirs).

L'optimisation du procédé d'épuration et les contraintes d'encombrement sont les paramètres de choix essentiels. Selon les circonstances, cette épuration physico-chimique peut être simultanée avec l'un des processus suivants

- neutralisation, avec utilisation possible du TURBACTOR sous pression,
- oxydation ou réduction.

Ces processus mettent en jeu des automates de régulation du pH ou du potentiel redox.

1.5. TRAITEMENT BIOLOGIQUE

Le recours à l'épuration biologique dépend de la biodégradabilité des effluents, et sa conception doit tenir compte de particularités propres aux ERI

- les eaux qui ont subi un traitement préalable physico-chimique sont peu chargées en MES et leur DBO_5 est alors principalement soluble,
- leur composition en nutriments est rarement équilibrée. Une correction de la teneur en P et/ou N doit souvent être pratiquée,
- les fortes concentrations en sels minéraux sont fréquentes et leurs variations rapides peuvent perturber le développement de l'épuration (chimie de synthèse), - des âges de boue élevés sont souvent utiles à la stabilité et à l'efficacité du procédé,
- une attention particulière doit être apportée au maintien de zones de pH et de la température à des valeurs relativement constantes,
- le démarrage des installations peut nécessiter des ensemencements appropriés.

Les différents procédés mis en œuvre sont:

- boues activées,
- cultures fixées (lits bactériens à matériau plastique, BIOFOR, BIODROF),
- traitements anaérobies (ANALIFT, ANAPULSE, ANAFLUX, ANAFIZ).

1.6. TRAITEMENT TERTIAIRE

Ce traitement peut avoir différents objectifs, après épuration biologique:

- réduction des MES,
- élimination de composés spécifiques (HPA, phénols etc.),
- réduction de la DCO colloïdale résiduelle, qui requiert de fortes doses de coagulant

Ce traitement, réalisable selon des configurations très différentes, peut ainsi mettre en oeuvre

- des décanteurs (DENSADEG, TURBOCIRCULATOR),
- des flottateurs (FLOTAZiJR, ...),
- des filtres granulaires, avec ou non pré

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

pondérance d'une vie biologique (par appoint d'air ou d'oxygène).

L'application de réglementations de plus en plus strictes peut aussi requérir l'élimination de la **DCO soluble non biodégradable,** de la couleur et d'autres éléments spécifiques. Cette DCO est due à des composés organiques de nature diverse: solvants, dérivés nitrés et sulfonés, colorants, etc. Les procédés possibles d'élimination sont alors les suivants:

- adsorption sur charbon actif à régénération thermique ou chimique (procédé DEGRÉMONT, cf. page 228) ou sur adsorbants divers,
- ultrafiltration,
- oxydations diverses: oxygène à hautes température et pression, chlore, ozone.

Bien que de nombreux composés organiques soient colorés, la majorité d'entre eux n'absorbent pas la lumière dans la partie visible du spectre, mais dans la région de l'ultraviolet. Quelle que soit leur origine, naturelle ou artificielle, ces colorants possèdent des groupements chromophores, c'est-à-dire des fonctions ayant un excès d'électrons, (doubles ou triples liaisons, cycles aromatiques), et des hétérocycles renfermant de l'oxygène, du soufre ou de l'azote. Parmi les voies possibles pour décolorer les eaux, l'une utilise des réactions d'oxydation pour dégrader les molécules responsables de la couleur en faisant appel à des oxydants puissants, tel l'ozone.

Figure 924. Malterie de VITRY-LE-FRANÇOIS (Marne). Épuration biologique et traitement tertiaire des eaux usées pour recyclage. Débit: 100 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

1.7. PARTICULARITÉS DU TRAITEMENT DES BOUES

Les boues provenant des différentes étapes du traitement des effluents industriels, présentent souvent une forte concentration en matières minérales qui peut en rendre la déshydratation plus facile, mais l'incinération sans intérêt ou délicate (carbonatation du circuit de lavage des fumées, par ex.).

Leur épaississement et leur déshydratation se différencient de ceux des boues urbaines

- les boues à dominante minérale peuvent être épaissies avec de forts flux massiques et des temps de stockage d'autant plus élevés que les boues sont peu fermentescibles. Il est ainsi possible de réaliser des épaississeurs d'une hauteur utile atteignant 8 m.
- dans le cas de boues mixtes d'origines différentes, il peut quelquefois y avoir tendance à une stratification dans l'épaississeur et on doit alors y remédier soit par un recyclage des boues sur l'appareil, soit en conservant deux chaînes d'épaississement distinctes; les destinations finales des boues déshydratées peuvent alors ne pas être les mêmes,
- en déshydratation, des filtres à bande type SUPERPRESSDEG sont mieux adaptés que d'autres systèmes tels que centrifugeuses ou vis presseuses. Ils peuvent en effet accepter des boues de concentration et qualité très variables, même en cours de journée.

1.8. ODEURS

Le tableau ci-dessous présente différents produits malodorants fréquemment présents dans certaines ERI L'élimination des odeurs est traitée au chapitre 16, page 866 et chapitre 24, page 1327.

Industries	Origine des odeurs
Cimenteries, fours à chaux	Acroléîne, amines, mercaptans, ammoniaque, sulfure de dibutyle, H_2S, SO_2, ...
Industries pharmaceutiques	Produits de fermentation
Industries alimentaires	Produits de fermentation
Industries alimentaires (poissons)	Amines, sulfures, mercaptans
Industries du caoutchouc	Sulfures, mercaptans
Industries textiles	Composés phénoliques
Industries de la pâte à papier	H_2S, SO_2,
Compostage organique	Ammoniaque, composés soufrés

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2. INDUSTRIES AGRO-ALIMENTAIRES

2.1. PORCHERIES ET AUTRES ÉLEVAGES

Les eaux rejetées par les élevages de porcs se caractérisent (voir page 89) par des concentrations très élevées en MES et MO (exprimées en DBO_5 et DCO) ; de plus, il convient de remarquer que ces rejets sont très concentrés en azote (N-NH_4 et N-NTK).

Dans tous les cas, un stockage préliminaire dans une capacité brassée est nécessaire. Selon le type d'alimentation et le mode d'élevage, un dégrillage fin est à prévoir.

2.1.1. Élevages de taille moyenne (< 5 000 porcs)

Le traitement comprend deux stades biologiques en série (figure 925).

. Un premier stade anaérobie.

Il comprend un réacteur à cultures libres, suivi d'une séparation liquide/ solide (décanteur/épaississeur, filtre à bande, centrifugeuse): le rendement d'élimination est de 40 à 60 % de la DCO et des MES, et de plus de 90 % de la DBO_5. En revanche, l'élimination de l'azote est faible.

- **Un deuxième stade aérobie** par boues activées.

Il est associé de préférence au traitement d'autres effluents ou même d'effluents urbains. Il comporte généralement une zone anoxie et doit être dimensionné pour la réduction de la pollution azotée.

L'ensemble du traitement permet de restituer au milieu naturel un effluent ayant les caractéristiques d'un effluent urbain épuré par voie biologique; les boues produites sont utilisables en agriculture.

2.1.2. Élevages importants ou unités centralisées de traitement de lisiers

La chaîne de traitement précédente est applicable.

La quantité de NH_4 à éliminer justifierait la mise en oeuvre d'un strippage à la vapeur suivi d'incinération de buées ou d'un strippage à l'air avec production d'engrais. La préconcentration des lisiers par évaporation suivie d'une centrifugation (avec l'aide d'huile d'appoint recyclable) est aussi envisagée.

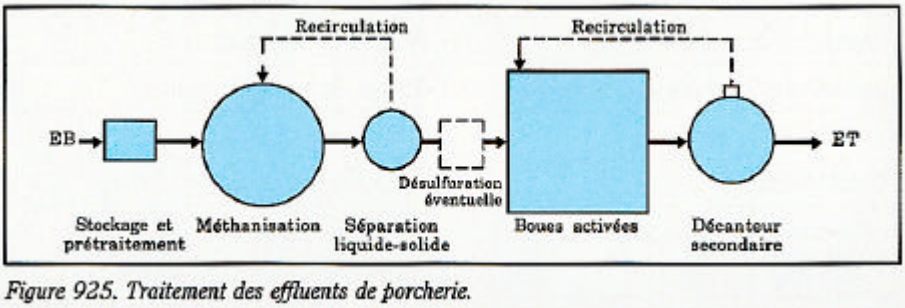


Figure 925. Traitement des effluents de porcherie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2. ABATTOIRS, CONSERVERIES DE VIANDES ET INDUSTRIES ASSOCIÉES

Priorité est donnée aux aménagements internes et à une récupération très poussée du sang. La qualité des prétraitements est essentielle.

Figure 926. Abattoirs de SAPCO à PLOUAY (Morbihan). Traitement des effluents par flottation.
Débit: 2 000 $m^3 j^{-1}$. Vue de surface du flottateur.

2.2.1. Prétraitements

Une attention particulière est apportée aux opérations de dégrillage et de tamisage en raison de la forte proportion de produits grossiers dans les MES (viande, graisses, poils, boyaux, paille, etc.).

- **Le dégrillage** (8 à 12 mm) est réalisé sur grille droite ou courbe.
- **Le tamisage** sur grille à espacement millimétrique est réalisé soit sur champ fixe à barreaux ou tôle perforée, soit sur un champ mobile sans fin (voir page 603).

Un bon tamisage élimine 5 0 à 80 % des MES et 10 à 30 % de la DBO_5.

- **Le dégraissage** est réalisé le plus souvent dans des dégraisseurs à insuflation d'air (voir page 615). Il permet d'éliminer 30 à 40 % des matières grasses.
- **Le refroidissement** des eaux chaudes est parfois opportun en abattoirs de volailles.

2.2.2. Traitement physico-chimique

Il s'agit d'une floculation des eaux dégrillées et tamisées, suivie d'une séparation du floc, le plus souvent par flottation à l'air dissous.

La floculation est provoquée soit à la neutralité par le chlorure ferrique et un polymère, soit en milieu acide et par addition de lignosulfonates si l'on désire récupérer les protéines floculées.

Cette récupération est envisageable dans des abattoirs équipés d'un atelier d'équarrissage ou associés à une conserverie de viande. Elle permet la valorisation de ces produits sous forme de farinette après séchage thermique. Ce traitement élimine jusqu'à 70 à 80 % de la DBO_5. et 85 à 90 % des MES.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.2.3. Traitement biologique

Selon les normes de rejet, il est réalisable

- en boues activées à moyenne ou à faible charge,
- ou sur lits bactériens à remplissage plastique, après prétraitement soigné.

Une bonne séparation des circuits de l'abattoir permet d'envisager le traitement anaérobie des effluents les plus concentrés. Dans le cas fréquent de traitement conjoint avec des ERU, cette technique peut constituer un prétraitement biologique économique.

2.2.4. Fabrication de gélatines et colles animales

Les eaux fortement alcalines du chaulage et du lavage de l'osséine sont prédécantées avec recyclage du lait de chaux, puis neutralisées par carbonatation au gaz de fumée. Les eaux acides (préparation des "pig skins") subissent un dégraissage par flottation à l'air dissous. Après stockage en bassins tampons respectifs, les eaux sont mélangées, neutralisées par acidification et traitées en aération prolongée.

Figure 927. Installation de BRIEC (Finistère) pour l'épuration des ERU et des effluents de l'abattoir. Capacité: 2,2 t.j^{-1}. Traitement par aération prolongée.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.3. INDUSTRIES LAITIÈRES

2.3.1. Traitements liés à la fabrication

La figure 92 8 donne un schéma général des principaux circuits de fabrication en soulignant les emplois possibles des techniques du traitement des eaux.

2.3.1.1. Recyclage de condensats d'évaporation

En évaporation de lait ou de lactosérum, il y a production de condensats peu minéralisés (eau de vache), contenant un peu de lactose, et qu'il est intéressant de recycler, soit en lavage de sol, soit même vers les chaudières BP (voir page 1359).

2.3.1.2. Fabrication de caséine

La précipitation de la caséine du lait à pH 4,6 peut être assurée par acidification préalable à pH 2,5 sur résine fortement acide d'une fraction de lait. Un procédé original utilise (figure 929)

- un réacteur d'acidification TURBACTOR,
- un lit turbulent de résine, type ECI.

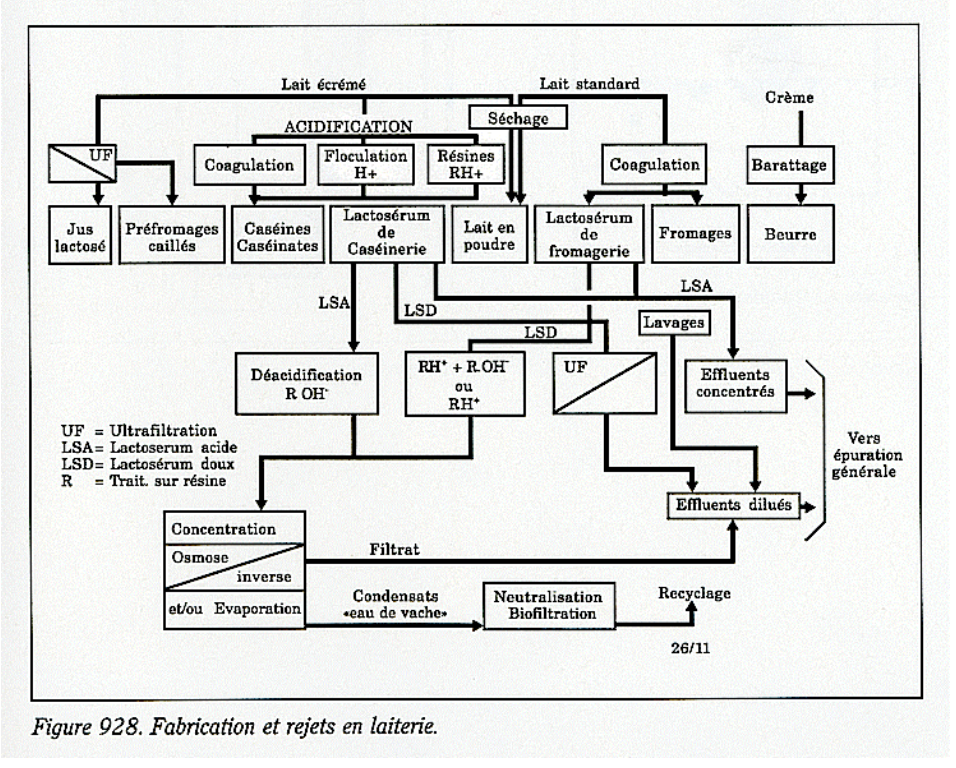


Figure 928. Fabrication et rejets en laiterie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.3.2. Effluents généraux

Le traitement comporte les stades suivants (voir figure 930)

2.3.2.1. Prétraitement

Après dessablage, l'élimination des graisses par flottation à l'air est recommandée particulièrement quand une fraction importante des fabrications est constituée par le beurre et les crèmes.

2.3.2.2. Traitement général

- **Bassin d'homogénéisation**

Il œrrespond souvent à 1 à 3 postes de travail et permet une autorégulation du pH. Une correction de ce pH demeure néanmoins nécessaire pour tenir compte des pointes exceptionnelles.

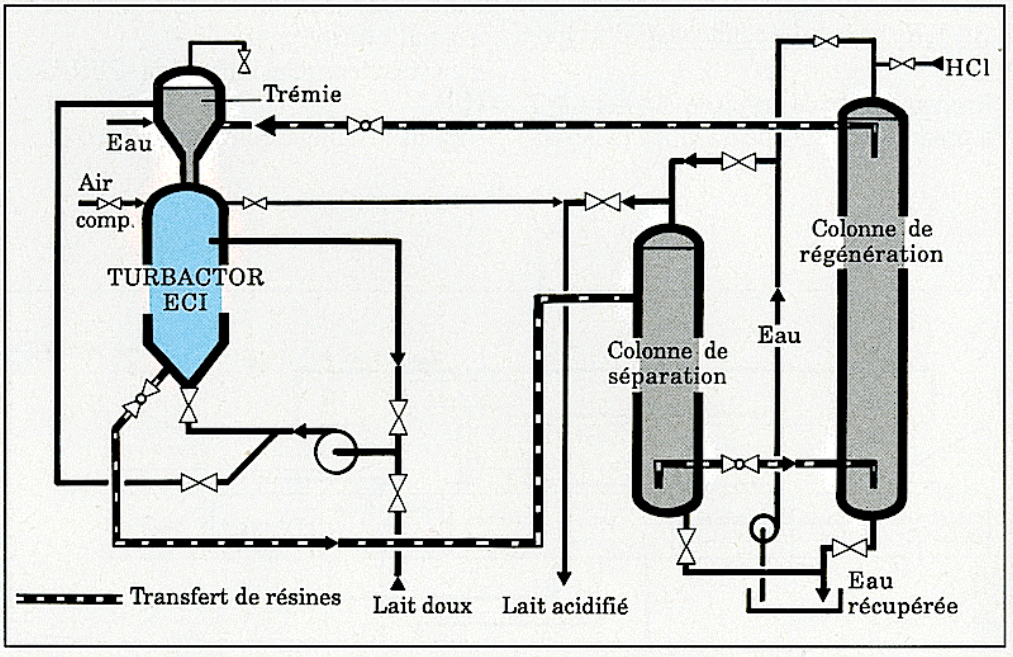


Figure 929. Fabrication de caséine par acidification sur résine.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

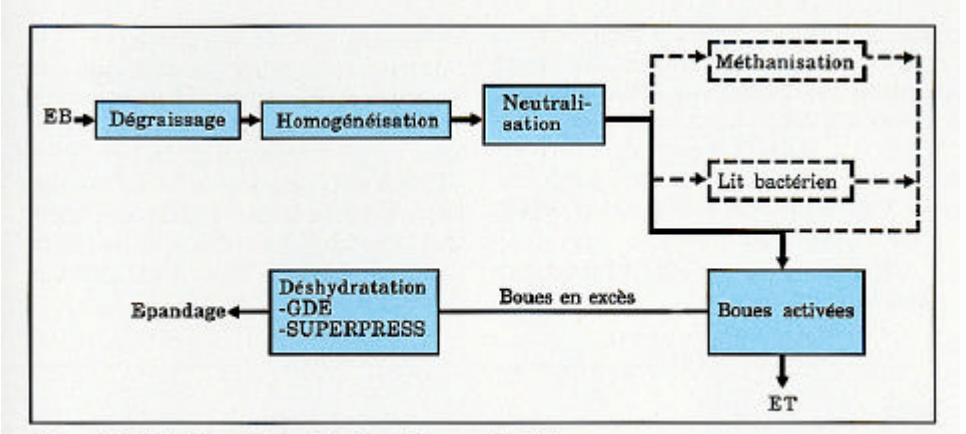


Figure 930. Traitement des effluents généraux de laiterie.

Figure 931. Laiterie SAINT-HUBERT à MAGNIFRES (Meurthe-et-Moselle). Épuration des effluents par méthanisation. Capacité DCO: 2,8 t.j^{-1}. Vue sur le réacteur ANAFIZ.

- **Épuration biologique**

Elle peut comporter un premier stade avant BA qui permet un gain de place et une réduction importante de la dépense énergétique globale. Ce premier stade peut être effectué

- par méthanisation si les effluents sont relativement concentrés et contiennent de 1 à 2 % de lait (réacteur ANAFIZ),
- sur lit bactérien à matériau ordonné. Celui-ci accepte des variations importantes de charge et assure une dégradation

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

rapide du lactose. Une recirculation est presque toujours indispensable pour assurer un débit hydraulique minimal. Suivant le matériau, une charge en DBO_5 de 2 à 5 $kg/m^3.j$ permet d'assurer un rendement d'élimination de 70 à 50%. Ce traitement peut être suffisant avant rejet en égout communal.

L'épuration BA est généralement par aération prolongée.

2.3.2.3. Traitement des boues

Les boues sont très souvent épandues en cultures. Pour réduire leur volume et les adapter aux engins d'épandage, elles sont soit déshydratées sur SUPERPRESS, soit épaissies sur GDE. Cette dernière solution s'adapte particulièrement aux exigences du silotage et de l'épandage par tonne à lisier (concentration souhaitée de 6 à 8 %)

2.4. CONSERVERIES DE FRUITS ET LÉGUMES

Les conserveries sont des industries saisonnières qui séparent souvent les eaux de lavage relativement peu polluées et les eaux de fabrication, concentrées et chaudes (eaux de blancheur dont la DBO_5 peut atteindre 25 000 $mg.l^{-1}$ et les eaux de pelage à la vapeur): Avant homogénéisation, un tamisage est toujours nécessaire pour retenir les débris végétaux. Un traitement séparé des eaux de fabrication est souhaitable car elles contiennent une pollution principalement glucidique, rapidement dégradable par voie anaérobie, avec de faibles teneurs en azote. Un diges-

Photo 932. Laiterie d'ENTREMONT - Syndicat d'assainissement de MALESTROIT-MISSIRIAC-SAINT-MARCEL (Morbihan). Station d'épuration par aération prolongée. Capacité DBO5: 3 $t.j^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

teur de type ANALIFT est bien adapté à la concentration, parfois élevée, de (effluent en MES.

Le traitement aérobie peut être utilisé, soit directement sur l'ensemble des effluents, soit en aval d'une épuration anaérobie des eaux de fabrication. Il s'agit le plus souvent de BA à faible charge ou, éventuellement, d'un lagunage.

On peut rattacher à ces groupes d'industries la fabrication de plats cuisinés qui implique des schémas de traitement analogues, le premier stade pouvant être un lit bactérien.

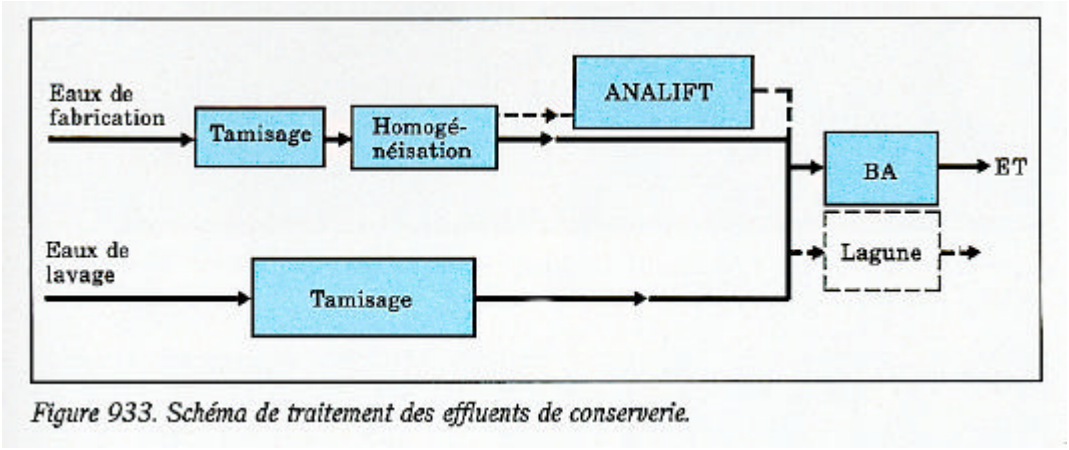
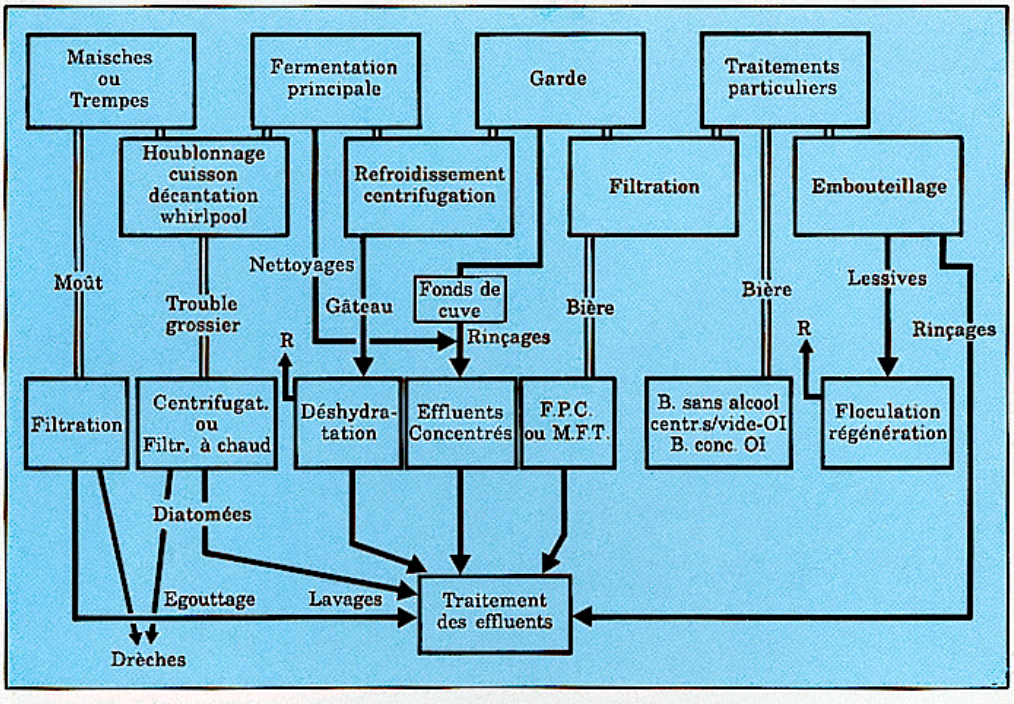


Figure 933. Schéma de traitement des effluents de conserverie.

Figure 934. Conserveries BONDUELLE à RENESCURE (Nord). Épuration des effluents par méthanisation. Capacité DCO: 18 t.j^{-1} '. Vue sur les deux réacteurs ANALIFT

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 935. Société FINDUS à BEAUVAIS (Oise). Épuration des effluents par boues activées. Capacité DBO_5. : 7, 5 $t.j^{-1}$.



MFT – Microfiltration tangentielle.
FPC – Filtres à précouche.
OI – Osmose inverse.
R – Recyclage ou récupération.
B. – Bière.
B. conc. – Bière concentrée.
Centr. – Centrifugation.

Figure 936. Schéma général des circuits de fabrication et rejets en brasserie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.5. BRASSERIES

La figure 936 donne le schéma général des principaux circuits de fabrication et des traitements particuliers.

2.5.1. Traitements particuliers ou liés à la fabrication

Ceux-ci sont inclus dans la fabrication ou nécessaires en prétraitement des effluents de certains ateliers. Ce sont:

- filtration des maisches,
- filtration sur Kieselguhr à chaud du trouble grossier,
- déshydratation complémentaire des gâteaux de centrifugation par filtrepresse,
- récupération des levures de fonds de cuve de garde par ultrafiltration ou centrifugation,
- floculation et régénération des lessives alcalines de (embouteillage.

Le soin apporté à ces opérations réduit les apports néfastes de drèches et Kieselguhr à (effluent général.

D'autres traitements sont aussi spécifiques des fabrications (microfiltration, osmose inverse).

2.5.2. Effluents généraux

La grande biodégradabilité de la pollution conduit à un mode d'épuration essentiellement biologique. Le schéma général est donné par la figure 937.

Un prétraitement est indispensable et comprend

- un macrotamisage adapté aux drèches, - un bassin d'homogénéisation régularisant le pH avec stockage éventuel séparé des eaux très alcalines.

La concentration en DBO_5 est souvent élevée et justifie alors un **traitement biologique** en deux stades.

. Le premier stade peut être constitué

- d'une méthanisation des effluents concentrés. Les techniques employées sont, soit l'ANAFLUX à lit fluidisé (figure 938), soit l'ANAPULSE, avec réacteur à lit de boues (figure 939).

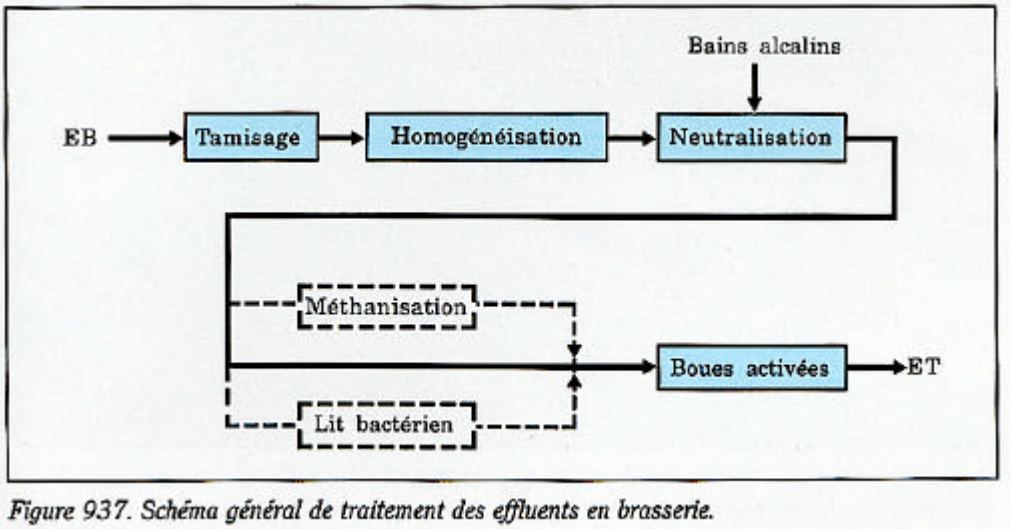


Figure 937. Schéma général de traitement des effluents en brasserie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 938. Brasserie EL AGUILA à SAN-SEBASTL9NDE LOS REYES (Espagne). Épuration des effluents par méthanisation. Capacité totale DCO: 50 $t.j^{-1}$. Vue sur les 4 réacteurs ANAFLUX Ø 5 m.

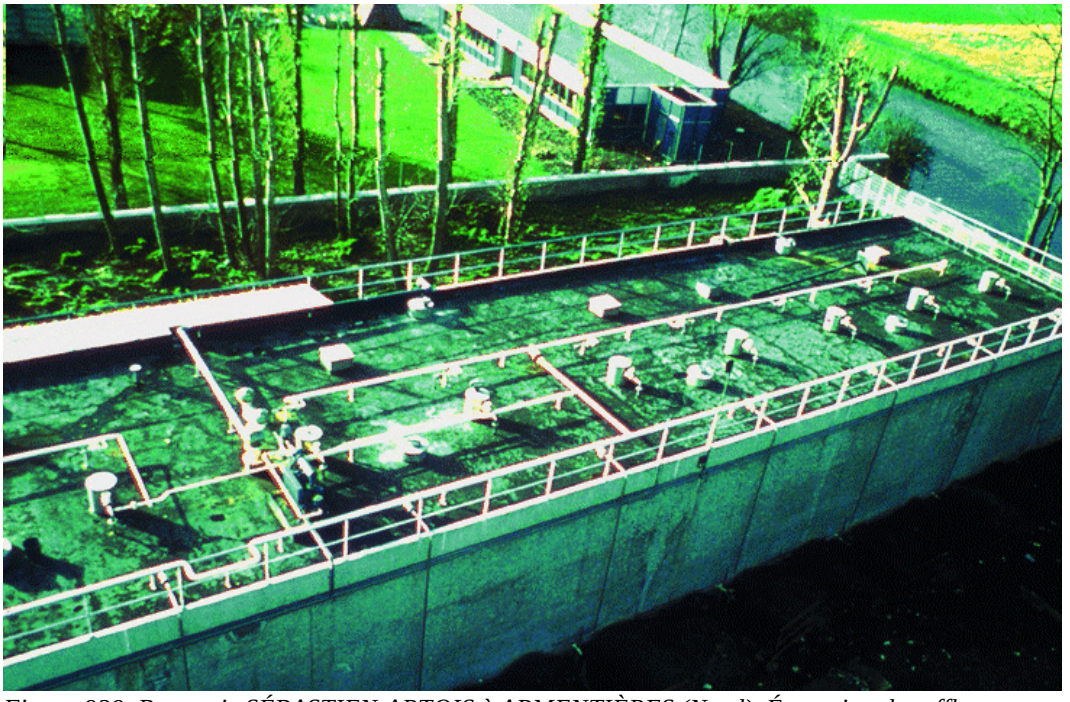


Figure 939. Brasserie SÉBASTIEN-ARTOIS à ARMENTIÈRES (Nord). Épuration des effluents par méthanisation. Capacité DCO: 10 $t.j^{-1}$. Vue générale sur le réacteur ANAPULSE.

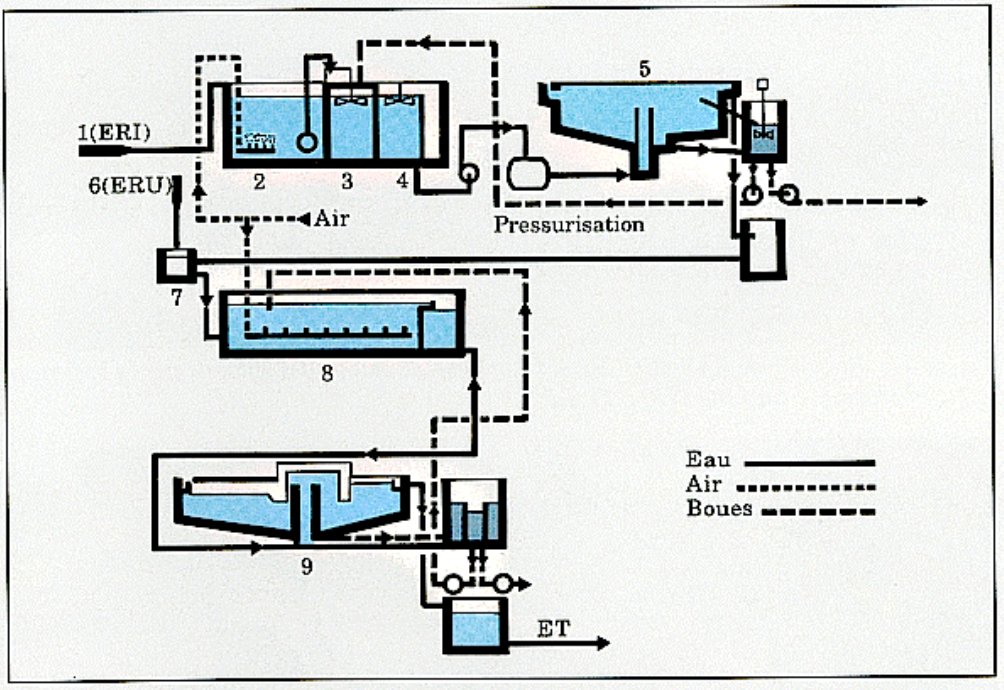
Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- d'un étage aérobie à forte charge. Les techniques employées sont
- le lit bactérien à remplissage de matériau plastique (figure 941),
- les boues activées à forte charge.

Dans ce dernier cas, l'emploi d'oxygène pur, associé à la flottation à l'air dissous, permet la réalisation d'installations compactes, comme dans le cas de la Grande Brasserie de CHAMPIGNEUL - LES (SEB) à MAXÉVILLE, où le traitement est combiné avec celui des ERU de la ville de NANCY (figure 940).

- **Le second stade** est généralement réalisé par boues activées à faible charge. Un rééquilibrage nutritionnel est normalement souhaitable. Il correspond le plus souvent à un apport de N et P en épuration aérobie et d'oligo-éléments en épuration anaérobie.

Il est à signaler que le traitement des effluents de fabrication de boissons gazeuses est très proche de celui des effluents de brasserie et fait l'objet de réalisations de plus en plus nombreuses.



1 - Effluents de brasserie.
2 - Bassin d'homogénéisation.
3 - Réacteur BA 3 étages à l'O_2 pur.
4 - Réacteur BA atmosphérique.
5 - SÉDIFLOTAZUR.
6 - Effluents urbains.
7 - Mélange ERI + 20 % ERU.
8 - Bassin d'aération BA.
9 - Clarificateurs.

Figure 940. Schéma du traitement des eaux de brasserie sur l'installation de MAXÉVILLE (Meurthe-et-Moselle). Effluents de brasserie : 17 t de DBO_5 par jour au maximum. ERU : 12,5 t de DBO_5 par jour en moyenne.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.6.
INDUSTRIES DE LA POMME DE TERRE ET FÉCULERIES

2.6.1. Aspects généraux

Les rejets de ces industries chargés d'amidon et de protéines sont très fermentiscibles et susceptibles de mousser. La récupération des protéines pour alimentation animale est fréquente.

En conséquence, il est nécessaire de séparer totalement les eaux boueuses de lavage des tubercules avec un circuit fermé indépendant, dont la purge peut être envoyée vers l'épuration biologique des eaux de procédés qui ont elles-mêmes subi le prétraitement de récupération des protéines.

2.6.2. Traitement des eaux de procédé

a) Fabrication de pommes chips, frites surgelées et purées.

Figure 941. Brasserie de SAN-MIGUEL (Philippines). Épuration des effluents par lit bactérien et boues activées - Capacité DBO_5. 14 $T.J^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 942. SITPA à ROSIÈRES-EN-SANTERRE (Somme). Épuration biologique d'ER de fabrication de purée de pommes de terre. Débit 500 m^3 h^{-1}.

La méthode de pelage (vapeur, soude) influe sur les précautions à prendre dans le traitement des effluents de transformation de la pomme de terre.

Les eaux de procédé qui proviennent des peleuses et de la coupe, contiennent des pelures et de la pulpe. Elles sont tamisées et décantées avec ou sans emploi de floculant de qualité alimentaire. Les matières séparées sont épaissies, avec stabilisation éventuelle à la vapeur, puis déshydratées (centrifugeuses ou filtres à bande), en vue de leur revalorisation en aliment du bétail.

Le traitement biologique situé en aval comporte un ou deux stades. Des solutions comparables à celles employées pour les conserveries sont le plus souvent retenues.

b) Féculeries

Les niveaux de pollution en DBO_5 et protéines sont considérablement plus élevés, même si on a séparé les eaux rouges en eaux concentrées provenant du râpage (DCO inférieure à 50 $g.1^{-1}$) et en eaux diluées provenant du raffinage et du lavage (DCO inférieure à 2 $g.l^{-1}$).

Le traitement des eaux rouges concentrées peut comporter, après prédécantation

- une floculation thermique (50-70 °C) en milieu acide, suivie d'une centrifugation éliminant 30 à 40 % de la DCO et 90-95 % de l'azote.

L'effluent doit ensuite être dirigé vers une épuration biologique générale.

2.7. SUCRERIES ET RAFFINERIES

Dans ces industries, le travail par campagnes contraint à stocker une partie des eaux résiduaires et à les traiter progressivement hors campagne.

2.7.1. Sucreries de canne

Les eaux de lavage de la canne qui comprennent aussi les condensats en excès et la purge du circuit des condenseurs barométriques véhiculent la quasi totalité de la pollution, (MES de 10 à 40 $g.l^{-1}$).

Leur recirculation est assurée à des taux variables de 30 à 90 %, à travers un poste de décantation qui sépare les MES; la concentration de la pollution dissoute se trouve ainsi accrue de 1,5 à 10 fois (DBO_5AD de 300 à 2 000 $mg.l^{-1}$). Ce poste comporte

- une séparation des sables par dessableur tangentiel ou cyclone,
- un tamisage,
- une floculation avec polyélectrolyte anionique et chaux qui assure aussi ellemême une certaine désinfection,
- un décanteur raclé qui restitue une eau pouvant encore contenir de 0,5 à 1 $g.l^{-1}$ de MES.

Les eaux recyclées doivent subir une désinfection complémentaire (KEMAZUR) et les eaux rejetées sont épurées biologiquement soit par BA, soit dans des lagunes facultatives.

2.7.2. Sucreries de betteraves

Les effluents sont constitués principalement par des eaux boueuses, et présentent deux caractéristiques principales

- concentration progressive de la pollution de 3 à 5 fois au cours d'une campagne de 2 à 3 mois, du fait des recyclages opérés,
- forte tendance à (acidification, d'où nécessité d'une addition de chaux: selon

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

les usines, on se limite à la neutralisation, ou au contraire, on élève le pH considérablement (pH 11) pour bénéficier d'une action désinfectante. De fortes concentrations d'alcalinité calcique peuvent alors favoriser des précipitations massives de $CaC0_3$ lors du traitement (méthanisation).

Ces eaux boueuses sont presque toujours traitées dans un circuit fermé, dont la purge constitue la source principale d'effluents, à laquelle sont ajoutées diverses eaux de procédé (diffusion, presse à pulpes, éluats de régénération de résines).

La DBO_5. des eaux de surverse croit tout au long de la campagne d'environ 1 à 4 $g.1^{-1}$.

- **L'équipement du circuit semi-ouvert comprend**

- un épierrage par dessableur,

- un tamisage sur cribles vibrants ou grilles horizontales (2 à 3 mm),

- une floculation par polyélectrolyte anionique PROSEDIM, et éventuellement appoint de chaux,

- un décanteur-épaississeur (Ø 30 à 60 m) dont la surverse recyclée peut encore contenir de 0,2 à 1 $g.l^{-1}$). MES (circuit court),

- l'évacuation des boues vers des lagunes (bassins à terre) où s'effectue une post-décantation avant recyclage complémentaire. Ces eaux sont, dans le cas de circuit à pH neutre, soit conditionnées à l'oxygène pur, soit chlorées.

Dans le cas de lavoirs à liqueur dense, cette décantation peut être supprimée (circuit long).

- **L'épuration biologique de la purge de déconcentration** est assurée

- soit, tout le long de l'année, par lagunage anaérobie puis aérobie, dans des lagunes placées en aval des bassins à terre,

Figure 943. Sucrerie ZUCKER FABRIK à JULICH (RFA). Épuration des effluents avec méthanisation par ANALIFT suivie de BA - Capacité DCO: 30 $t.j^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- soit par la combinaison d'une épuration anaérobie (principalement durant la campagne) et d'une épuration en lagune aérée ou naturelle.

La méthanisation est réalisable en contact anaérobie du type ANALIFT ou par cultures fixées (ANAFIZ-ANA-FLUX). Le choix de la technique doit tenir compte des risques de précipitation de $CaCO_3$.

- Les condensats en excès, peu chargés en DBO_5 et dépourvus de MES, peuvent être traités sur lit bactérien avant recyclage ou rejet.

2.8. DISTILLERIES

Les distilleries rejettent des vinasses épuisées chaudes concentrées en sels (K en particulier), et très polluées DBO_5. > 50 $g.l^{-1}$ pour certaines vinasses non diluées). La concentration en MES peut être parfois très forte (rejets de 20 à 100 kg de MES par hl d'alcool pur pour les vinasses de lie, de grains ou d'extraction de marcs). La récupération éventuelle d'acide tartrique permet d'abaisser le niveau de pollution.

L'épuration doit comporter un traitement biologique en deux stades, éventuellement précédé d'une élimination des MES. La chaîne de traitement est la suivante

- homogénéisation et refroidissement, la température des vinasses, non diluées, pouvant s'étager entre 70 et 95 °C,
- neutralisation (pH initial de 3 à 6),
- élimination des MES, (tamis vibrants ou drainants, centrifugeuses, flottateurs, filtres-presses); beaucoup de ces appareils requérant un conditionnement préalable,
-digestion anaérobie ou, pour les effluents les moins concentrés, épuration aérobie sur lit bactérien à remplissage plastique qui peut, avec un fort recyclage, assurer un certain refroidissement,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 944. Distillerie ARALI (Paraguay). Epuration des effluents par méthanisation. Capacité DCO: 54 $t.j^{-1}$. Vue des réacteurs ANALIFT.

- boues activées, avec éventuellement nitrification-dénitrification, ou lagunage aéré

Les DCO finales obtenues sont très.dépendantes de la nature extrêmement variée de ces effluents Dans certains cas, les effluents peuvent être concentrés dans une évaporation.

Seuls les condensats sont alors traités par voie biologique

Il est à noter que les effluents de **levurerie** sont susceptibles de traitements analogues.

Figure 945. Cave coopérative de CAVET (Hérault). Épuration des effluents par méthanisation. Capacité DCO: 4,2 t.j^{-1}. Vue générale de l'installation et du réacteur ANAFLUX.

2.9. HUILERIES ET SAVONNERIES

2.9.1. Extraction des huiles

Les eaux de procédé provenant des presses et des centrifugeuses sont faiblement acides et présentent des DBO_5. de 5 à 25 g.l^{-1}. Elles sont tamisées, stockées en bassin tampon. Après récupération éventuelle des huiles par flottation à l'aide d'un gaz neutre dissous, elles doivent subir un traitement aérobie en aération prolongée, après une méthanisation éventuelle intermédiaire.

Pour l'huile d'olive, une acidification à pH 4 est souhaitable afin d'améliorer la séparation des huiles.

2.9.2. Raffinage des huiles

Les divers effluents nécessitent des prétraitements qui peuvent être (figure 946)

- dégraissage dans des bassins dégraisseurs assurant quelques heures de rétention,
- flottation à l'air dissous des effluents salins acides (10 à 50 g.l^{-1} de SO_4^{2-}) et huileux de procédé, après floculation permettant le recyclage des huiles en savonnerie ou une autre revalorisation; le matériel doit être adapté à la forte acidité,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- fermeture des circuits des condenseurs sur réfrigérants, dont la purge est réunie aux eaux de procédé.

Le mélange des différents rejets est ensuite nécessaire dans des bassins tampons qui ont aussi un rôle de refroidissement.

Le traitement principal peut comporter les phases suivantes

- neutralisation à la chaux,
- décantation avec recyclage externe des boues pour assurer une certaine maîtrise de la sursaturation en $CaSO_4$
- épuration biologique par BA, en général par aération prolongée.

La flottation et le traitement physico-chimique permettent normalement d'éliminer une fraction importante de la pollution organique: 30 à 60 % de la DCO et 95 à 98 % des matières grasses, avec des niveaux de DCO dans l'eau brute variant de 3 à 9 $g.l^{-1}$.

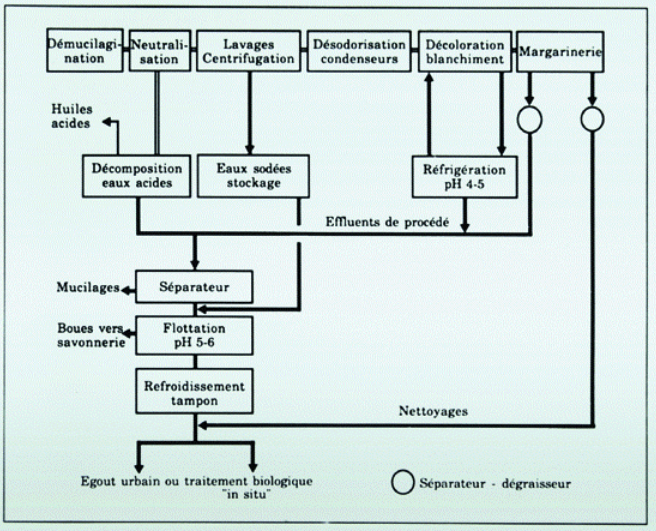


Schéma des prétraitements en raffinage d'huiles et margarinerie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

2.10. TANNERIES ET INDUSTRIES DU CUIR

2.10.1. Prétraitement

Lorsque les circuits sont séparés, on prévoit les prétraitements suivants

- **Eaux alcalines sulfurées** ("Épilage Pelanage")

Après dégrillage fin, dégraissage et dessablage des eaux, les sulfures sont oxydés à l'air, par voie catalytique, en thiosulfates et produits d'oxydation intermédiaires.

- **Bains de tannage**

Après dégrillage fin, dégraissage, des sablage et homogénéisation, ils sont neutralisés à pH 8,5 par carbonate de sodium ou magnésie et soude. Les boues obtenues sont épaissies, puis déshydratées, avant lixiviation du chrome à pH 1. L'acide chromique est recyclé en fabrication (80 % de récupération du chrome des rejets) après réajustement du pH.

- **Eaux riches en solvants.**

Les solvants utilisés en dégraissage (white spirit kérosène, monochlorobenzène, etc.), sont séparés par strippage à la vapeur ou distillation sous vide.

En l'absence d'une séparation des circuits, l'effluent général doit subir un prétraitement mécanique complet, puis une

Figure 947. Tannerie SCHAEFER à EUSKIRCHEN-FLAMERSHEIM (RFA). Épuration biologique des effluents avec bassin profond. Eau épurée = DBO_5. < 10 $mg.l^{-1}$; Cr(III) < 2 $mg.l^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

oxydation catalytique des sulfures. Ce schéma conduit à l'accroissement de la consommation de réactifs et de la production de boues lors du traitement général.

2.10.2. Traitement général

Il comporte

- dégrillage fin, dessablage, dégraissage
- homogénéisation,
- décantation primaire après floculation éventuelle,
- épuration biologique en aération prolongée.

Les boues extraites sont, soit méthanisables avec les déchets d'écharnage, soit déshydratables sur SUPERPRESSDEG ou sur filtre-presse et ensuite incinérables avec les déchets.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

3. INDUSTRIES PAPETIÈRES

3.1. FABRIQUES DE PÂTE A PAPIER

L'examen des caractéristiques des eaux résiduaires rejetées par ce type d'industrie (voir page 98) montre que les concentrations en polluants sont très variables selon le procédé de fabrication.

La figure 948 donne le schéma général de traitement.

Ce traitement réduit la DBO_5 de plus de 90% et la DCO de 50 à 80 %.

L'utilisation de l'oxygène pur en boues activées (figure 949) permet de réaliser des installations plus compactes avec réduction des risques de nuisances.

Les condensats d'évaporation des liqueurs noires peuvent représenter jus-

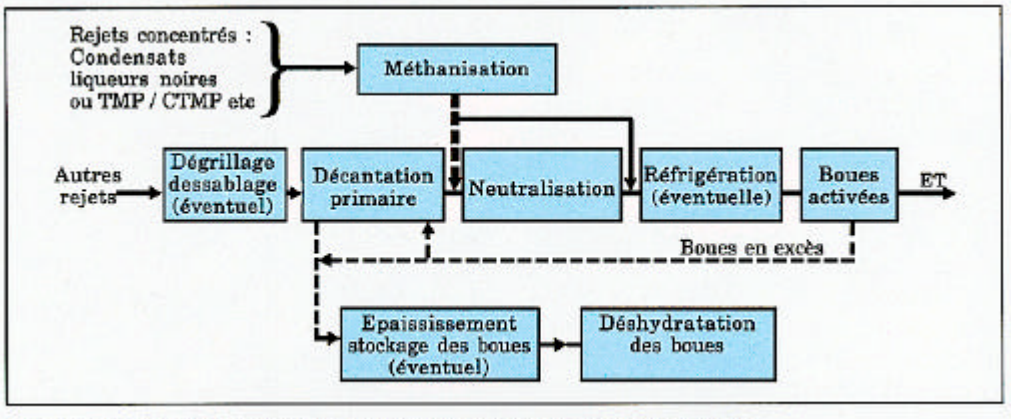


Figure 948. Schéma général de traitement des effluents de pâte à papier.

Figure 949. Papeterie RIOCELL à PORTO ALEGRE (Brésil). Production: 720 $t.j^{-1}$. de pâte Kraft. Épuration des effluents avec traitement biologique à l'oxygène pur et traitement tertiaire physico-chimique (98 % d'élimination de la DBO_5). Vue générale de la station d'épuration.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

qu'à 50 % de la pollution de l'usine dans moins de 10 % du volume des rejets. Ceci rend extrêmement intéressant le procédé de méthanisation. Son rendement (élimination de la DCO peut atteindre 80 % pour des charges volumiques appliquées en DCO de 6 à 40 kg/m^3.j^{-1} suivant la technique choisie: ANALIFT, ANAFIZ, ANAFLUX, ANAPULSE. La présence de composés soufrés peut nécessiter un prétraitement adapté.

Dans le cas de fabrication de pâte chimique blanchie, il peut s'avérer intéressant de séparer les rejets acides, peu chargés en MES et les rejets basiques, très chargés en MES. Leur mélange se fait dans le bassin de neutralisation, après décantation primaire des rejets basiques.

- **Pâte CTMP avec papeterie**

Les rejets provenant de fabrication de pâte CTMP présentent une DCO de plusieurs $g.l^{-1}$ ce qui permet (figure 948), après traitement physico-chimique, de réaliser un traitement par méthanisation. Les effluents ainsi traités sont ensuite mélangés aux autres rejets (papeterie principalement) puis traités par BA.

Ce schéma permet de réduire la DBO_5 de 90 à 98% et 1a DCO de 80 à 90%.

- **Pâte TMP avec papier journal**

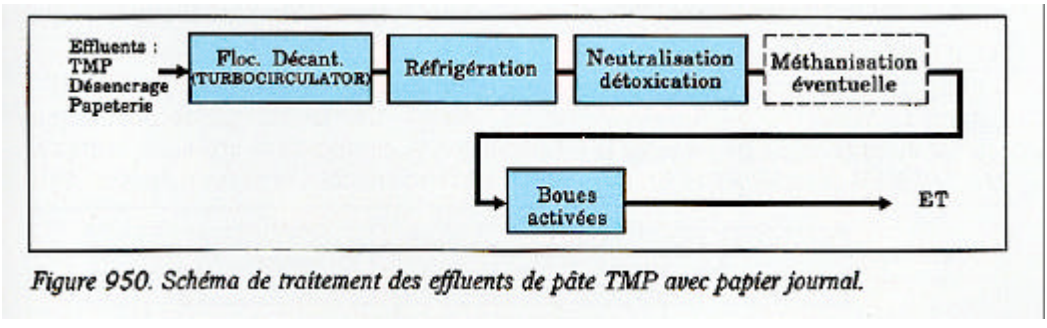


Figure 950. Schéma de traitement des effluents de pâte TMP avec papier journal.

Dans des unités modernes, du fait des recyclages internes accrus, les rejets groupés (et chauds) sont envoyés sur une seule chaîne de traitement (figure 950).

- **Autres procédés d'épuration**

Le procédé de lagunage aéré, un certain temps très utilisé, l'est beaucoup moins, en raison de son plus faible rendement d'épuration, de son encombrement important et de désagréments spécifiques (envasement des lagunes, aérosols, brouillards, risques d'odeurs, etc.).

Lorsqu'une épuration plus poussée est recherchée, en particulier la décoloration des eaux, un traitement complémentaire est à prévoir en sortie du traitement biologique qui peut inclure

- traitement physico-chimique: coagulation-floculation (chaux ou sulfate d'aluminium, polymère, à des taux de traitement souvent importants), suivie de décantation, flottation ou filtration,
- filtration biologique sur BIOFOR (sans action sur la couleur),
- traitement spécifique: charbon actif, ultrafiltration des effluents les plus colorés, décoloration à l'ozone, etc.

3.2. FABRIQUES DE PAPIERS ET CARTONS

La grande diversité de production de papiers et cartons nécessite d'étudier chaque cas avec soin et de bien connaitree tous les paramètres liés à la fabrication: matières premières utilisées, charges ajoutées, type de papier ou car-

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

ton fabriqué, équiments de récupération interne existants, etc

3.2.1. Traitement interne sur circuit court

L'industrie papetière étant consommatrice d'eau et la matière première coûteuse, il convient de rechercher une récupération maximale de fibres et d'eau conduisant à la réduction du prix de revient, et à la diminution de la taille de la station d'épuration finale.

Cette récupération interne de fibres et/ou d'eau est réalisée par les techniques suivantes

- flottation sur SÉDIFLOTAZUR avec ou sans réactifs,
- filtration.

Bien entendu, les taux de recyclage possibles sont fonction de la qualité du papier fabriqué

3.2.2. Traitement final sur circuit long

Pour simplifier, on peut distinguer deux grandes catégories de fabrications.

3.2.2.1. Usines fabriquant du papier pour ondulé ou du carton à partir de vieux papiers recyclés

Il est alors possible de recycler la totalité des MES récupérées et une grande partie de l'eau, de sorte que la purge de. rejet est très concentrée en MO (DCO supérieure à 2 $g.l^{-1}$).

La figure 951 donne le schéma de traitement correspondant.

Un bassin tampon est indispensable pour régulariser les débits.

La coagulation-floculation est réalisée par injection de sulfate d'aluminium et de polyélectrolyte ; le TURBOCIRCULATOR permet d'éliminer 95 à 99 % des MES, le rendement sur la DCO et la DBO_5 étant variable selon la quantité de colloïdes présents. Dans certains cas, le TURBOCIRCULATOR peut être remplacé par un flottateur SÉDIFLOTAZUR.

La méthanisation réduit la DCO de 60 à 90 % pour des charges appliquées variables de 6 à 40 kg $DCO/m^3.j^{-1}$ selon la technique utilisée. Le méthane récupéré permet, par mise en place d'une chaudière de production de vapeur, de rendre l'installation autonome en énergie.

Si, après méthanisation, les rendements d'épuration sont insuffisants pour respecter les normes de rejet imposées, un traitement biologique par boues activées est nécessaire, réduisant la DBO_5 d'environ 90 % et la DCO d'environ 80 %.

- **Variantes de traitement possibles**

Après traitement physicochimique, selon la composition des eaux brutes et les rendements d'épuration désirés, d'au

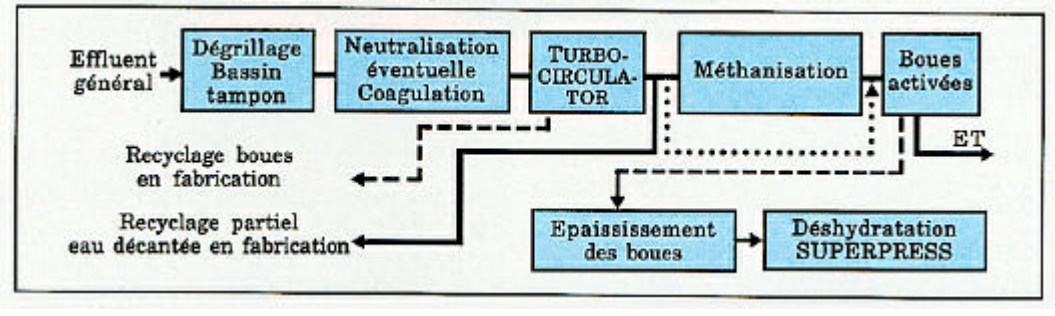


Figure 951. Schéma de traitement d'effluents d'usine à cieux papiers.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

tres schémas de traitement biologique sont possibles

- avec boues activées, suivies ou non de filtration biologique sur BIOFOR ou BIODROF,
- avec lit bactérien à ruissellement suivi, ou non, de filtration biologique (figure 952).

Dans tous les cas, les boues primaires sont recyclées en fabrication, de sorte que seules les boues biologiques en excès sont à déshydrater après épaississement préalable. Cette déshydratation est réalisée, le plus souvent, par filtres à bandes presseuses SUPERPRESS ou GD-PRESSE, appareils susceptibles de déshydrater tout type de boues.

3.2.2.2. Usines fabriquant du papier à partir de pâte neuve

La fabrication de ce type de papier ne permet généralement pas de recyclage de MES et d'eau à partir de la station de traitement Ces recyclages sont réalisés sur des circuits courts. En conséquence, les consommations d'eau sont généralement plus importantes et les concentrations en DCO et DBO_5 trop faibles pour envisager un traitement biologique par méthanisation. Différents schémas de traitement sont possibles selon les concentrations en polluants et les rendements d'épuration désirés.

- **Traitement physico – chimique** (figure 953)

Un bassin tampon est là aussi nécessaire. La coagulation floculation est réalisée par injection de sulfate d'aluminium et de polymère. Cette injection peut être supprimée lorsqu'un traitement biologique est mis en oeuvre Le TURBOCIRCULATOR peut éventuellement être remplacé par un SÉDIFLOTAZLIR. Le rendement d'élimination des MES est compris entre 95 et 99 %.

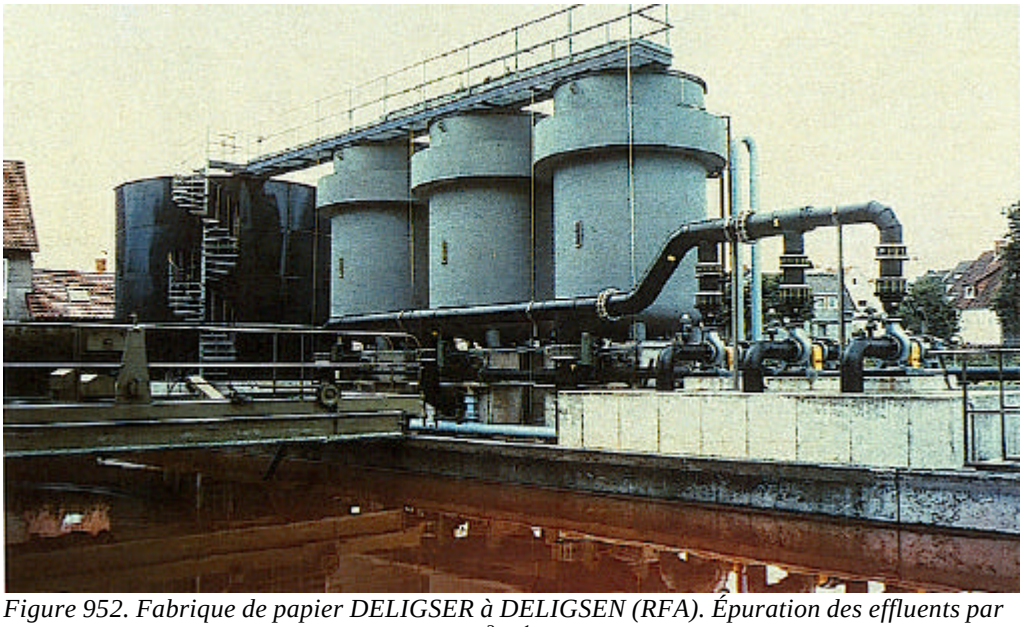


Figure 952. Fabrique de papier DELIGSER à DELIGSEN (RFA). Épuration des effluents par lit à ruissellement et BIODROF Débit: 105 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

La déshydratation des boues est réalisée au mieux par filtre à bandes SUPERPRESS. Selon la composition des boues ou la place disponible, d'autres systèmes sont utilisables: vis presseuse, centrifugeuse, filtre-presse.

- **Traitement biologique**

Selon les concentrations en DBO_5 de l'eau prétraitée et les rendements désirés, plusieurs schémas sont envisageables (figure 955).

Dans tous les cas, les boues biologiques en excès peuvent être déshydratées en mélange avec les boues primaires.

Le schéma (2) est le plus courant et donne d'excellents rendements d'élimination: DBO_5. 90 à 98 % ; DCO, 80 à 90 %.

Le schéma (4), d'un coût d'investissement supérieur, est applicable dans le cas de concentration en DBO_5 supérieure à 300 $mg.l^{-1}$ et lorsque l'on recherche un rendement d'épuration très élevé et une consommation énergétique plus faible que celle du schéma (2). Les rendements

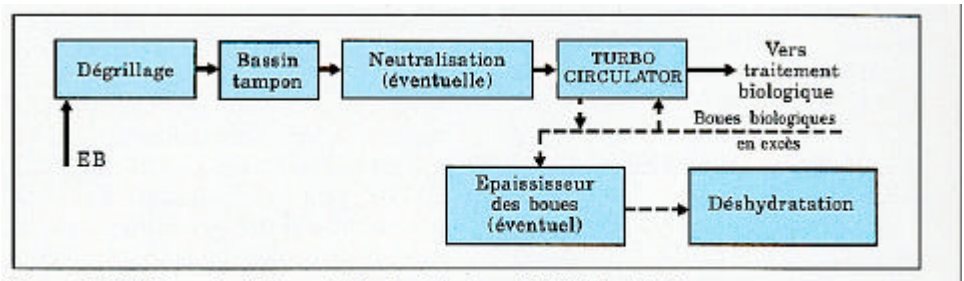


Figure 953. Schéma de traitement physico-chimique d'ERI de papeterie.

Figure 954. Complexe papetier BEGHIN-SAY à CORBEHEM (Pas-de-Calais). Épuration des effluents par traitements physico-chimique et biologique. Capacité: 650000 éq. hab.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

d'élimination obtenus sont de 90 à 99 en DBO_5. 85 à 95 % en DCO et la teneur en MES de l'effluent traité est de 5 à 20 $mg.l^{-1}$.

Les schémas (1) et (3) sont applicables dans certains cas particuliers

(1) : rendement d'élimination recherché de la DBO_5 inférieur à 70 %,

(3) : DBO_5 de l'eau brute inférieure à 100-15 c) $mg.l^{-1}$ et rendement recherché inférieur à 60-70 %.

Le schéma (3) peut, en outre, être utilisé en traitement de finition du schéma (2) ou (4), ce qui permet alors d'obtenir un effluent traité contenant moins de 5 à 10 mgl^{-1} de MES et DBO_5.

- **Traitements complémentaires éventuels**

L'élimination de la DCO non biodégradable et de la couleur peut être réalisée par des traitements spécifiques, à étudier dans chaque cas particulier, tels que: adsorption sur charbon actif, ultrafiltration, ozonation, précipitation chimique.

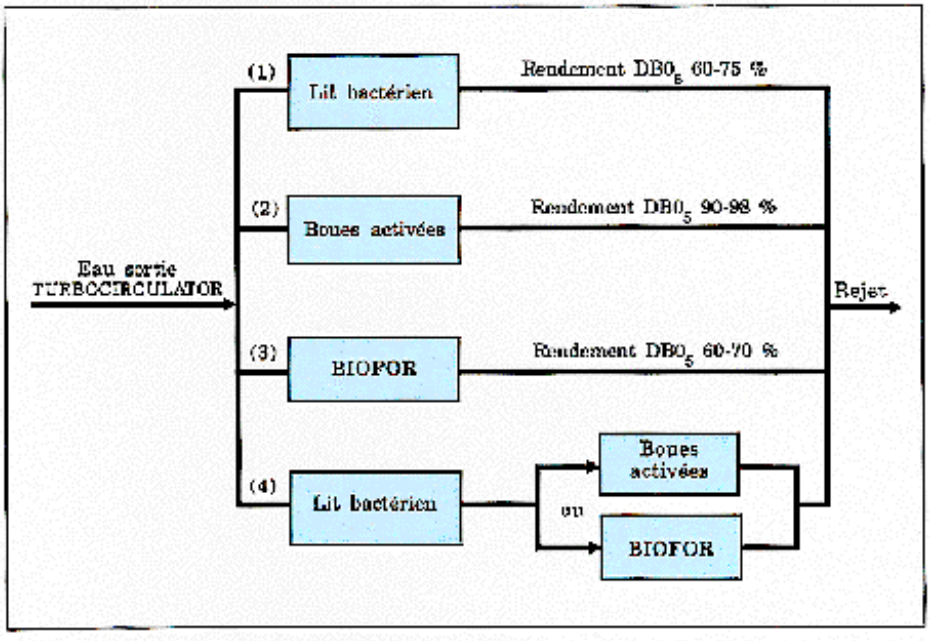


Figure 955. Schémas possibles d'épuration biologique d'ERI de papeterie.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

4. INDUSTRIES DU PÉTROLE

4.1. PRODUCTION

Les eaux de gisement, ou eaux produites, provenant du séparateur triphasique du brut (water knockout tank), sont prédéshuilées (cyclone ou séparateur lamellaire) puis subissent un traitement de finition qui est fonction de leur destination (figure 956).

- **Rejet en pleine mer**

Flottation mécanique (hydrocarbures 40 $mg.l^{-1}$), flottation à l'air dissous ou coalescence (,< 10 $mg.l^{-1}$).

- **Réinjection**

Dégazage éventuel et filtration sur sable.

La réinjection est recherchée parce qu'elle évite la présence de bactéries sulfato-réductrices et l'incompatibilité chimique avec l'eau du réservoir (inévitables dans le cas d'injection d'eau de mer). Elle ne requiert pas, en général, la désoxygénation des eaux.

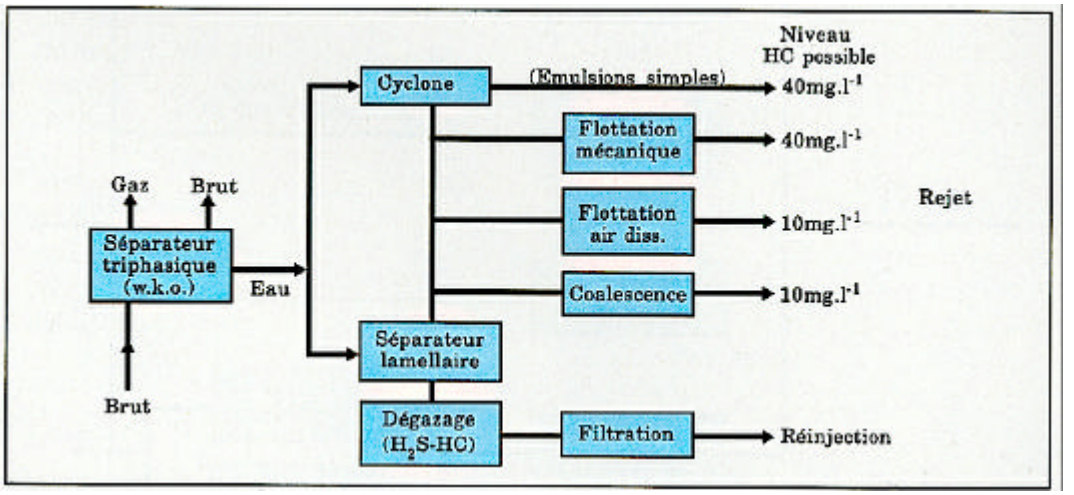


Figure 956. Traitements des eaux de gisement.

4.2. TRANSPORT ET DÉBALLASTAGE

Les eaux de déballastage sont transférées à grand débit vers des bassins tampons de stockage au sol dont elles sont ensuite extraites à débit pondéré vers une chaîne de traitement puis rejetées le plus souvent en mer.

En raison de leur stockage pendant quelques jours, elles sont bien décantées et la chaîne de traitement comporte simplement

- un prédéshuileur de sécurité écrêtant les pointes d'HC (interface des bassins),
- une flottation à air dissous avec coagulant organique du type KEMAZUR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Un traitement complémentaire d'élimination de DBO_5. ou de traces de phénols est rarement nécessaire, mais une filtration peut être prévue. En cas de nettoyage alcalin des tankers, la pollution émulsionnée est forte. Une correction de pH est nécessaire et il peut y avoir nécessité de recourir à un coagulant minéral ou d'assurer la précipitation de FeS. La chaîne comporte alors deux réacteurs au lieu d'un.

4.3. RAFFINAGE

L'organisation des rejets est variable suivant la nature et la taille des raffineries et la figure 957 représente une disposition fréquente de séparation des effluents dans laquelle on cherche à recycler les eaux peu salines, en appoint au circuit de réfrigération.

Les eaux pluviales huileuses, d'un débit très variable et important, sont stockées en bassin d'orage et subissent un déshuilage par filtration ou par flottation.

Selon leur concentration en DBO_5 soluble et en phénols, elles peuvent éventuellement être épurées biologiquement. Le traitement tertiaire, nécessaire à l'élimination des MES et aussi de phénols résiduels, peut être assuré sur des biofiltres (BIOFOR, BIODROF, OXYAZUR).

Les eaux de procédé, provenant du dessaleur ou d'un fluocraqueur catalytique sont plus salines et émulsionnées; elles peuvent aussi contenir une pollution en S^{2-} qui justifie un traitement préalable d'oxydation catalytique avant le déshuilage par floculation-flottation et l'épuration biologique (figure 958).

Deux aménagements sont fréquents

- **épuration physico-chimique:** la combinaison d'une filtration rapide d'eaux pluviales huileuses et d'une flottation à l'air dissous qui traite, elle, deux effluents de moindre débit (figure 959)

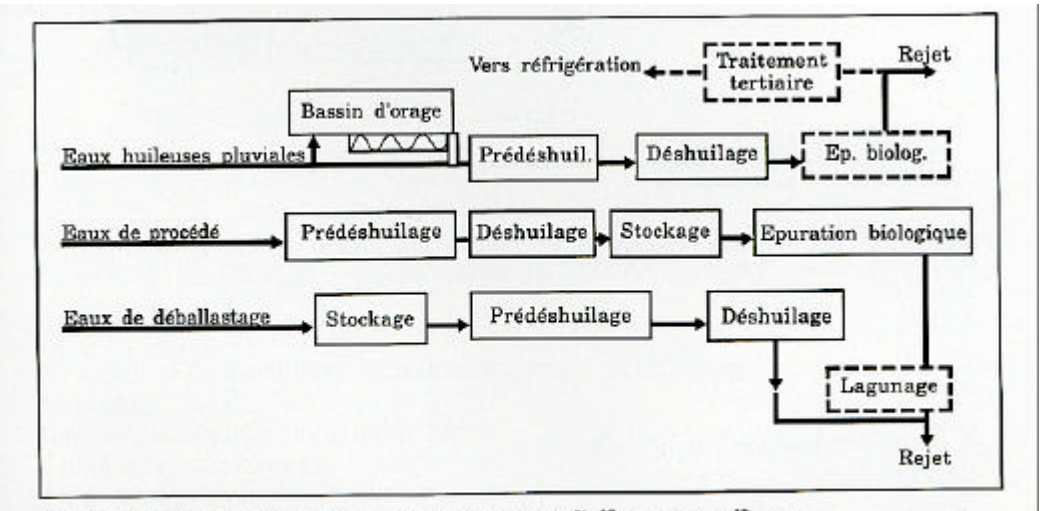


Figure 957. Principe d'organisation des traitements d'effluents au raffinage.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

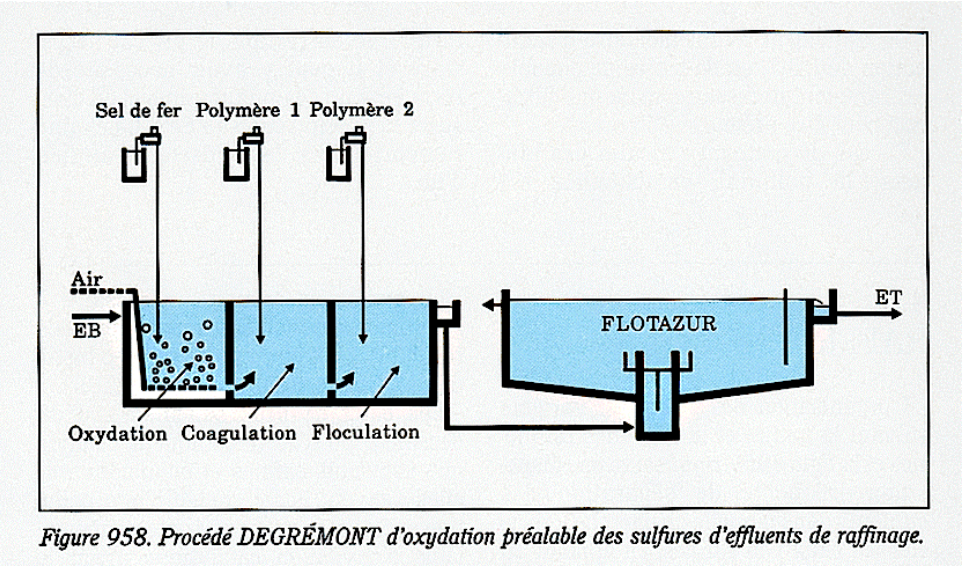


Figure 958. Procédé DEGRÉMONT d'oxydation préalable des sulfures d'effluents de raffinage.

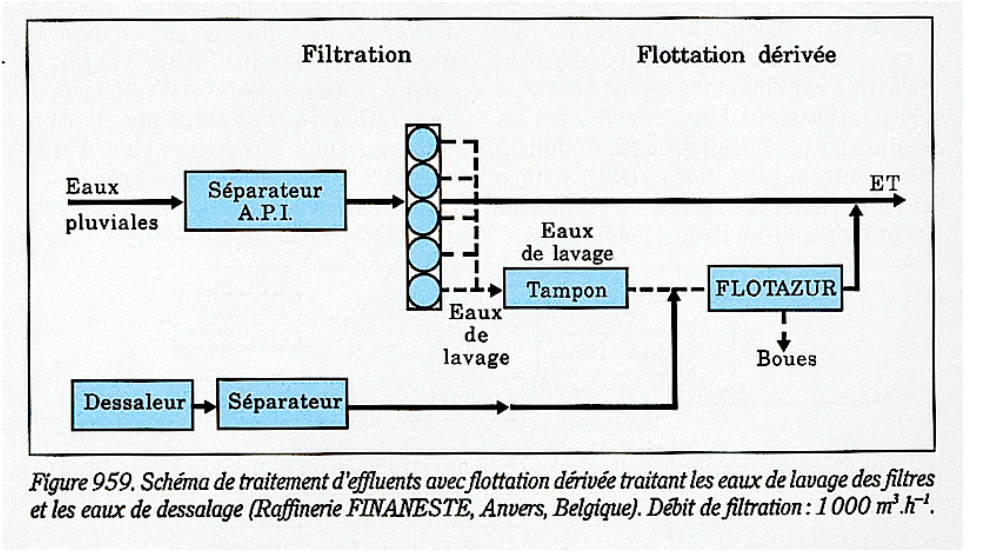


Figure 959. Schéma de traitement d'effluents avec flottation dérivée traitant les eaux de lavage des filtres et les eaux de dessalage (Raffinerie FINANESTE, Anvers, Belgique). Débit de filtration : 1 000 $m^3.h^{-1}$.

- les effluents de lavage de filtres, intermittents,
- les eaux émulsionnées du dessalage et autres procédés.

- **recyclage:** rejet séparé des eaux de déballastage (salines mais pauvres en DBO_5). et recyclage partiel, après deux étapes d'épuration biologique, des eaux de procédé et des eaux pluviales huileuses (peu salines) vers le réfrigérant atmosphérique (figure 961).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

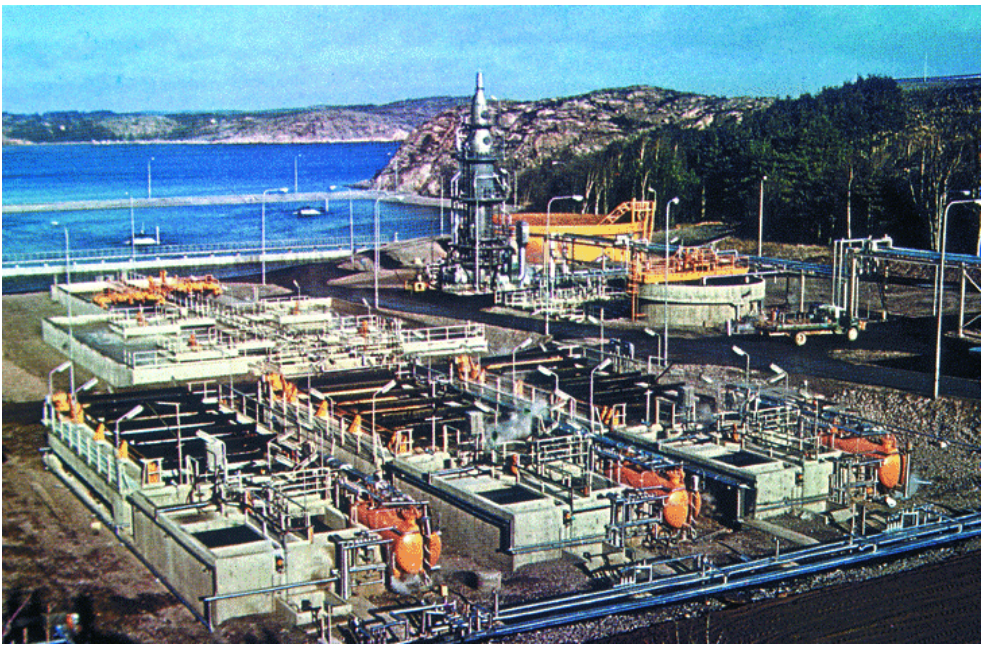


Figure 960. Raffinerie de SCANRAFF (Suède). Traitement des eaux de déballastage par flottation. Débit: 150 $m^3.h^{-1}$. Traitement des eaux de procédé par flottation et épuration biologique. Vue générale. Débit: 250 $m^3.h^{-1}$.

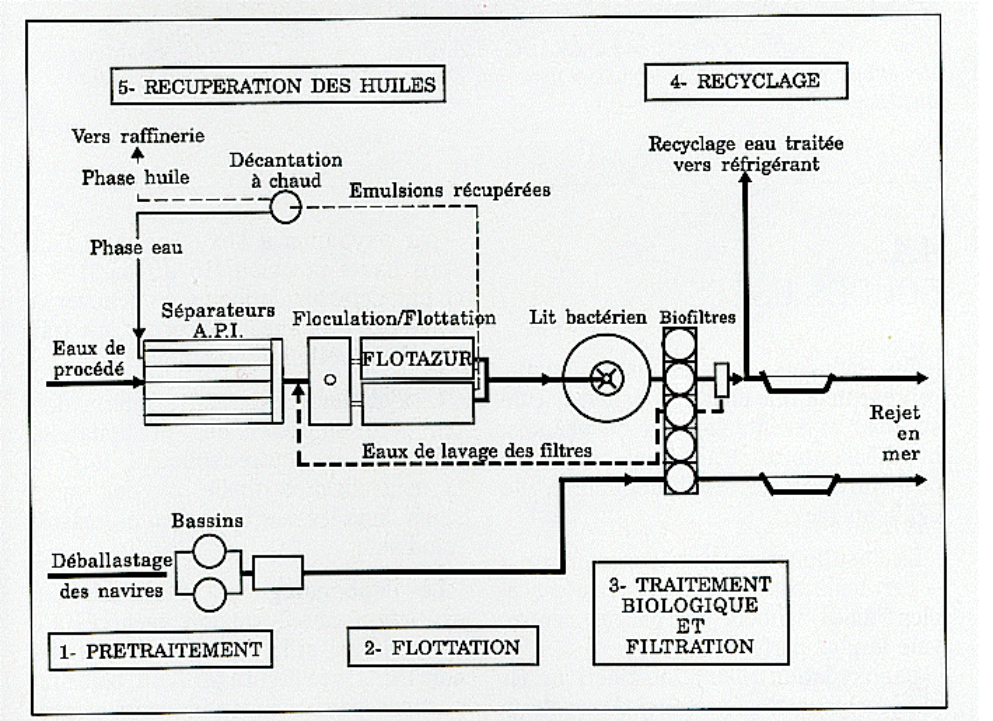


Figure 961. Schéma de traitement d'effluents de raffinerie avec recyclage d'eaux traitées. MOBIL-OIL, Notre-Dame de Gravenchon (Seine-Maritime). Débit: 400 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 962. Raffinerie du Paranà à ARAUCARIA (Brésil) pour PETROBRAS. Épuration des effluents : traitement biologique et flottation. Débit: 900 m^3 $.h^{-1}$. Vue sur le traitement biologique par BA.

4.4. SOUDES USÉES

Ces effluents, de très petit volume, représentent une charge considérable de sulfures et éventuellement de phénols, qui nécessite un traitement séparé de désulfuration et, éventuellement, de déphénolage.

La désulfuration peut être assurée

- par acidification à pH 3-4 et déplacement du H_2S, libéré par un gaz neutre, voie la plus performante,

- par oxydation à l'air atmosphérique, en milieu alcalin et en présence d'un catalyseur métallique, oxydation qui s'achève au stade $S_2O_3^{2-}$,

- par oxydation à l'oxygène ou à l'air, sous haute pression (15/20 bars) et à chaud. Cette oxydation peut s'achever au stage $S0_4^{2-}$ et aussi concerner une fraction de la pollution organique.

L'oxydation à des stades intermédiaires peut entraîner des précipitations gênantes de soufre colloïdal lors de la neutralisation finale, ou des corrosions dans les réacteurs haute pression "oxidisers".

Le déphénolage est réalisable par extraction par solvant non régénéré (LCO = fuel léger), si la concentration en phénols est élevée (figure 963) ou, plus simplement, par épuration biologique après dilution, dans les eaux résiduaires générales si la station est prévue pour.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

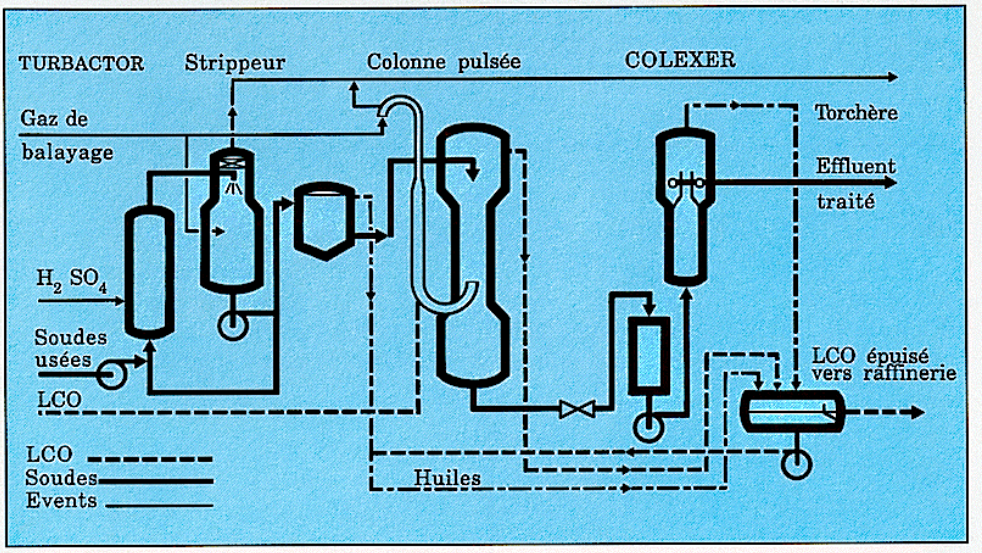


Figure 963. Schéma du traitement des soudes usées de la raffinerie de LINDSEY (Grande-Bretagne) par strippage et extraction au LCO. Débit : 1 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5. INDUSTRIES DU CHARBON ET CENTRALES THERMIQUES

5.1. LAVOIRS DE CHARBON

En aval de l'atelier de lavage du charbon, les eaux schlammeuses ou pulpes présentent des concentrations de 50 à 70 $g.l^{-1}$ en MES, d'une granulométrie inférieure à 0,5 mm. Elle subissent une décantation en deux stades qui économise les polymères (figure 964).

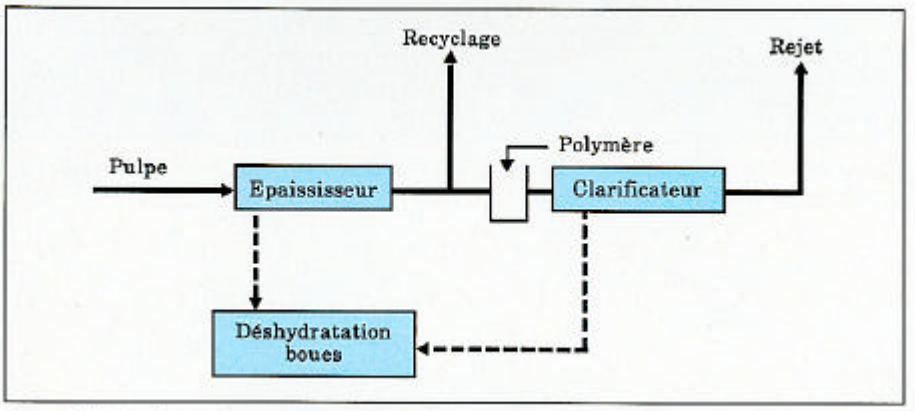


Figure 964. Schéma de traitement des eaux schlammeuses de lavoirs.

5.2. GAZÉIFICATION

Il faut distinguer les effluents de gazéification de première génération (ammoniacaux, goudronneux et phénolés), et ceux de gazéification de deuxième génération, principalement ammoniacaux.

Les premiers sont traitables de façon similaire aux liqueurs ammoniacales de cokerie (voir page 1436).

Les seconds sont décantés et strippés. Après oxydation catalytique des sulfures résiduels, ils peuvent subir une destruction poussée de l'ammonium fixe (lié aux chlorures) résiduel par nitrification et dénitrification biologiques qui éliminent simultanément les CN^- et SCN^- coprésents.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

5.3.
CENTRALES THERMIQUES

Lés principales chaînes de traitement concernent les eaux huileuses, les effluents de désulfuration des fumées et les effluents de nettoyage.

5.3.1. Eaux huileuses des centrales à fuel

Le fonctionnement de l'épuration est intermittent, lié au rythme des précipitations atmosphériques et des incidents de manipulation. La chaîne, destinée essentiellement à l'élimination d'HC insolubles, comporte un déshuileur circulaire ou lamellaire et, après coagulation, une flottation à l'air dissous ou une décantation.

5.3.2. Effluents de désulfuration des fumées

Ce sont des saumures acides constituées par les purges des circuits de lavage des fumées, pour l'élimination, soit de SO_2, seul, soit de $S0_2$ et NOx (produits d'oxydation de l'azote).

Dans le premier cas (figure 965), la chaîne DEGRÉMONT d'épuration comporte

-1re étape: désulfatation/neutralisation par la chaux,

- 2e étape: affinage et précipitation des métaux résiduels (SEDIPAC) dans une autre zone de pH.

Dans le second cas, il y a également présence d'ammonium dans l'effluent et le traitement comporte un strippage final à la vapeur, après alcalinisation.

Figure 965. Centrale thermique de OKA RIEDERSBACH (RFA). Traitement des purges de désulfuration. Débit: 15 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Dans des cas particuliers, l'acide formique présent peut être éliminé par voie biologique.

5.3.3. Effluents de nettoyage des réchauffeurs d'air et des faisceaux tubulaires des chaudières

Le traitement comporte un cyclonage des produits lourds, suivi d'une préneutralisation, d'une oxydation à l'air du fer ferreux et d'une décantation. Il peut quelquefois être complété par une alcalinisation à la soude (pH 11,5) avec strippage à la vapeur de l'ammonium ainsi déplacé.

Dans le cas de nettoyage fluorhydrique de faisceaux tubulaires, les fluorures présents doivent être précipités après l'oxydation; la neutralisation est toujours effectuée à la chaux.

5.3.4. Effluents de transport des cendres

Après dessablage rapide, les eaux de transport du laitier, les plus abondantes en volume, sont neutralisées et floculées avant d'être décantées rapidement (figure 966).

Les eaux provenant de lavage des électrofiltres, plus concentrées en cendres volantes, sont floculées et envoyées directement à l'épaississeur.

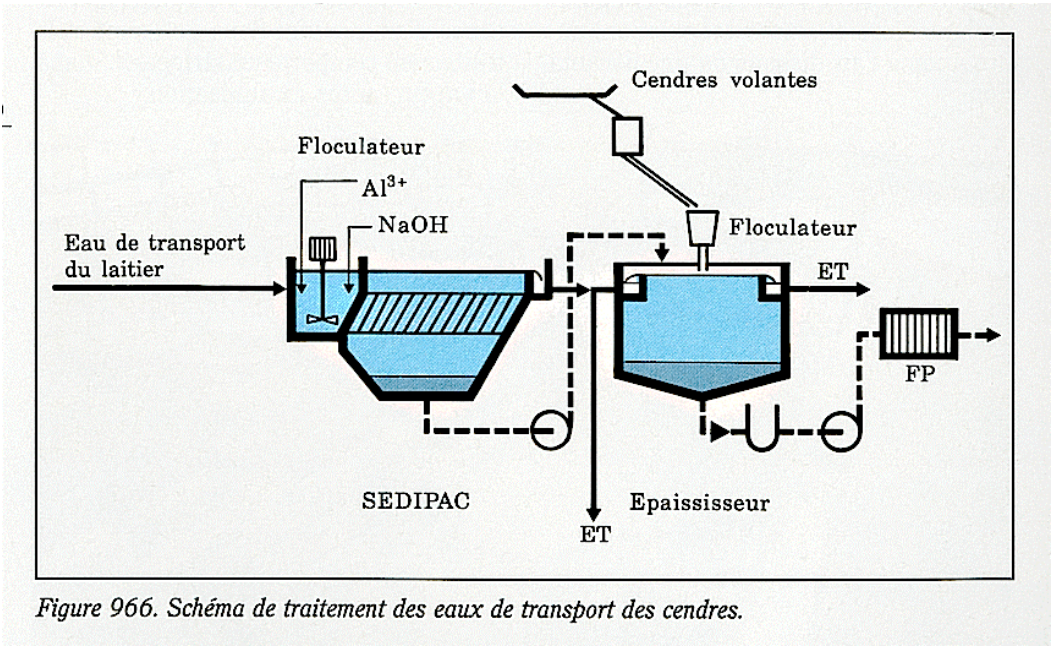


Figure 966. Schéma de traitement des eaux de transport des cendres.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 967. Centrale de KW SCHWANDORF (BEA). Décantation des eaux de transport des cendres - Débit: 130 $m^3.h^{-1}$.

5.4. USINES D'INCINÉRATION D'ORDURES MÉNAGÈRES (UIOM)

En règle générale, la purge du circuit de lavage de gaz doit être neutralisée et les métaux lourds précipités jusqu'à des valeurs résiduelles pouvant nécessiter l'utilisation, en stade final, d'additifs sulfurés de précipitation (voir page 151). En cas exceptionnel de fortes concentrations en produits d'oxydation du soufre (SO_3, S_2O_3), la désulfatation des eaux doit aussi être prévue, surtout si la neutralisation est effectuée à partir de chaux. Le traitement devient alors analogue à celui des effluents de désulfuration de fumées de centrales thermiques.

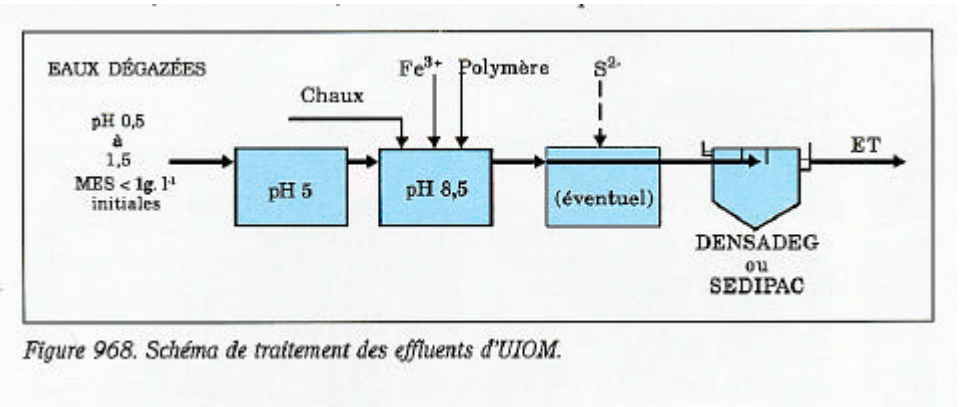


Figure 968. Schéma de traitement des effluents d'UIOM.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6. CHIMIE DE SYNTHÈSE ET INDUSTRIE PHARMACEUTIQUE

La caractéristique principale des effluents de ces industries, plus que pour toute autre, est la diversité des polluants ainsi que la grande variabilité, en charge et nature de pollution, des effluents rejetés. Bien souvent, les entreprises procèdent à des fabrications par campagne, pour un ou plusieurs produits, dont les cycles de production se répartissent dans l'année de façon aléatoire. En outre, une usine ne peut présumer du développement industriel de nouveaux produits et ignore bien souvent ce qu'elle fabriquera à l'échéance de 5 ou 10 ans.

Ces considérations guident la conception d'une installation d'épuration des effluents qui doit

- accepter les variations de débit et de charge polluante,
- être aussi polyvalente que possible, pour détruire les différents polluants qu'elle est susceptible de recevoir,
- réserver la possiblité de modifications ou de compléments, en prévision de changements dans les procédés de fabrication ou dans la nature même des produits de l'usine

6.1. PRÉCAUTIONS PARTICULIÈRES

6.1.1. Neutralisation et bassin-tampon

Le volume du bassin-tampon doit être aussi important que possible (normalement 36 h) et ne pas être inférieur à 24 h de production. Sa place, avant ou après neutralisation, est fonction des variations du pH des effluents, afin de profiter au maximum de l'effet d'auto-neutralisation.

Il faut noter que les doses de réactif de neutralisation (chaux...), peuvent être très importantes et engendrer une grande production de précipités, dont certains entartrants.

6.1.2. Épuration biologique - Odeurs

Ce type d'effluent présente le plus souvent une odeur forte due à des composés volatils (solvants, ...) dégazant naturellement

Le bassin d'aération est la principale source d'odeurs, aussi est-il préférable de recourir à des bassins profonds avec aération par air surpressé, injecté au moyen de diffuseurs type DIPAIR. Ceci permet de réduire la quantité d'air insufflé et donc, dans le cas de couverture du bassin, la quantité d'air vicié à capter ainsi que le dimensionnement du poste de désodorisation.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

6.1.3. Clarification

La salinité, très souvent élevée, et la présence de certains composés organiques (tensio-actifs, ...), conduisent fréquemment à une défloculation partielle et à des difficultés de décantation. Les clarificateurs doivent être largement dimensionnés.

Le respect des normes de rejet (MES) peut rendre souhaitable un traitement tertiaire (voir page 1383).

6.1.4. DCO résiduelle

Une part souvent importante de la pollution n'est pas biodégradable, ce qui se traduit par un « talon » de DCO résiduelle important dans l'eau traitée (DCO/DBO_5)> 10 après épuration biologique) et peut également justifier des traitements tertiaires.

6.1.5. Protection contre la corrosion

Du fait de la salinité importante et de la grande corrosivité des effluents, un grand soin doit être apporté au choix des matériaux: aciers inoxydables spéciaux, matériaux plastiques, revêtements convenablement choisis et appliqués, bétons spéciaux.

6.2. EXEMPLES DE RÉALISATIONS

Du fait de la très grande diversité de ces industries, il est difficile de décrire un schéma général de traitement. Quelques installations remarquables sont présentées ci-après.

6.2.1. Société Chimique ROCHE à VILLAGE NEUF (Haut-Rhin)

Cette usine produit principalement des

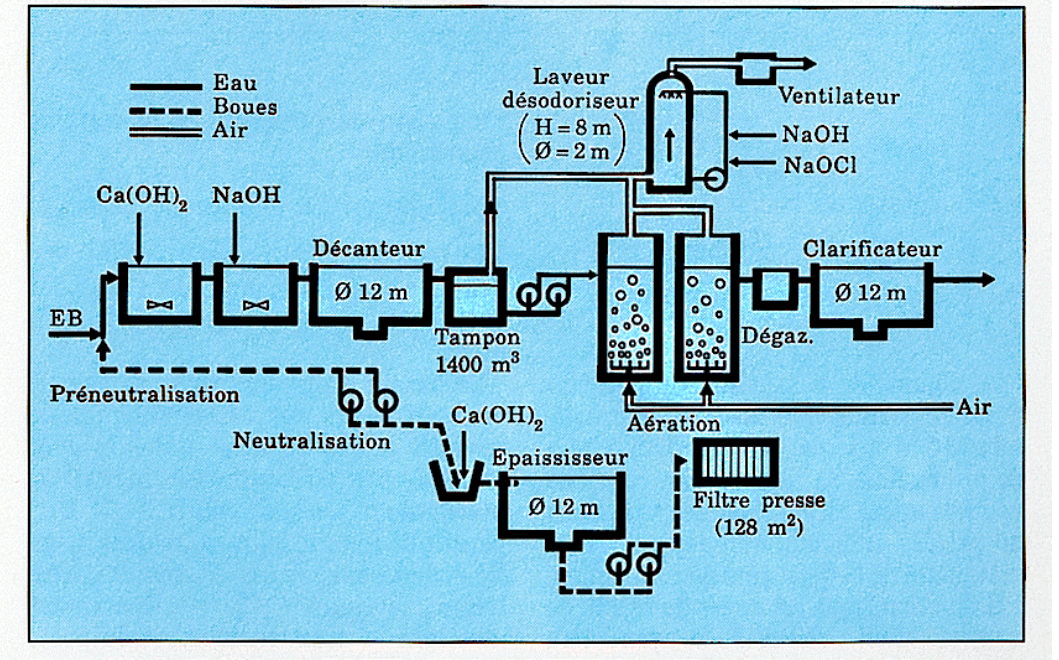


Figure 969. Société Chimique ROCHE à VILLAGE NEUF (Haut-Rhin). Schéma général de traitement.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 970. Station d'épuration de la Société Chimique ROCHE à VILLAGE-NEUF (Haut-Rhin).

vitamines et différents éléments pour l'alimentation animale, carotène en particulier.

Le volume journalier d'effluent est de 720 m^3.

La figure 969 donne le schéma de traitement dont les résultats sont présentés par le tableau suivant

	EAU BRUTE	**EAU TRAITÉE**
DCO $mg.l^{-1}$	3 200	400
DBO_5 $mg.l^{-1}$	2 200	25
MES $mg.l^{-1}$	-	100

La production annuelle de boue est de 850t de MS par an.

6.2.2. Société REXIM à HAM (Somme)

Cette usine produit principalement des acides aminés.

Le volume journalier d'effluents est de 3600 m^3.

La figure 971 donne le schéma de traitement dont les résultats sont présentés ci-dessous:

	Eau brute	**Eau traitée**	**Rendement**
DCO $kg.j^{-1}$	7100	1000	85
DBO5. $kg.j^{-1}$	4140	200	95
N organique $kg.j^{-1}$	2300	250	90
N-N1; $kg.j^{-1}$	2460	25	99
N-N03 $kg.j^{-1}$	-	1000	-
N global $kg.j^{-1}$	-	-	80

6.2.3. Société SHELL CHIMIE à BERRE (Bouches-du-Rhône)

Les fabrications de ce complexe pétrochimique, liées à la présence d'un vapocraqueur, sont très variées: polymère, polystyrène, polypropylène, alcools, solvants, huiles paraffiniques, ...

Le volume journalier d'effluents est de 14000 m^3.

La figure 973 donne le schéma de traitement dont les caractéristiques sont

- Charge entrante

- DCO 25 $t.j^{-1}$
- DBO5 15 $t.j^{-1}$

- Caractéristiques de l'eau traitée

- MES 15 à 30 $mg.l^{-1}$
- DCO_{AD} 100 à 130 $mg.l^{-1}$

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

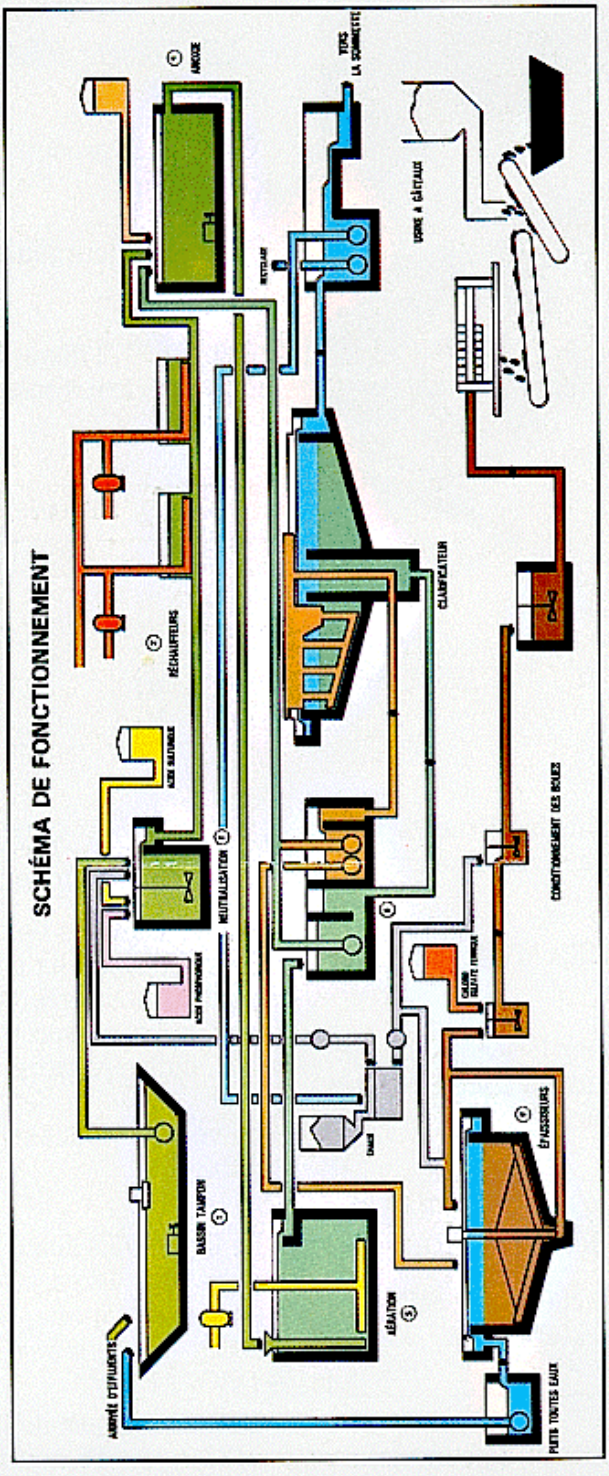
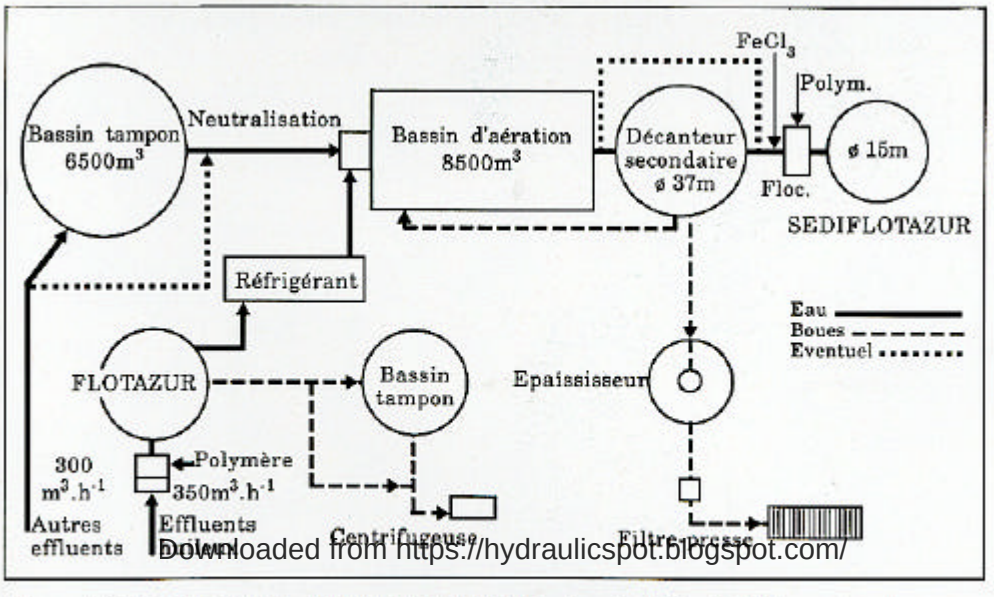


Figure 971. Société REXIM à HAM (Somme). Schéma général de traitement des effluents.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 972. Société REXIM à HAM (Somme). Vue générale de la station d'épuration.



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 973. Société SHELL CHIMIE à BERRE (Bouches-du-Rhône). Schéma général de traitement des effluents.

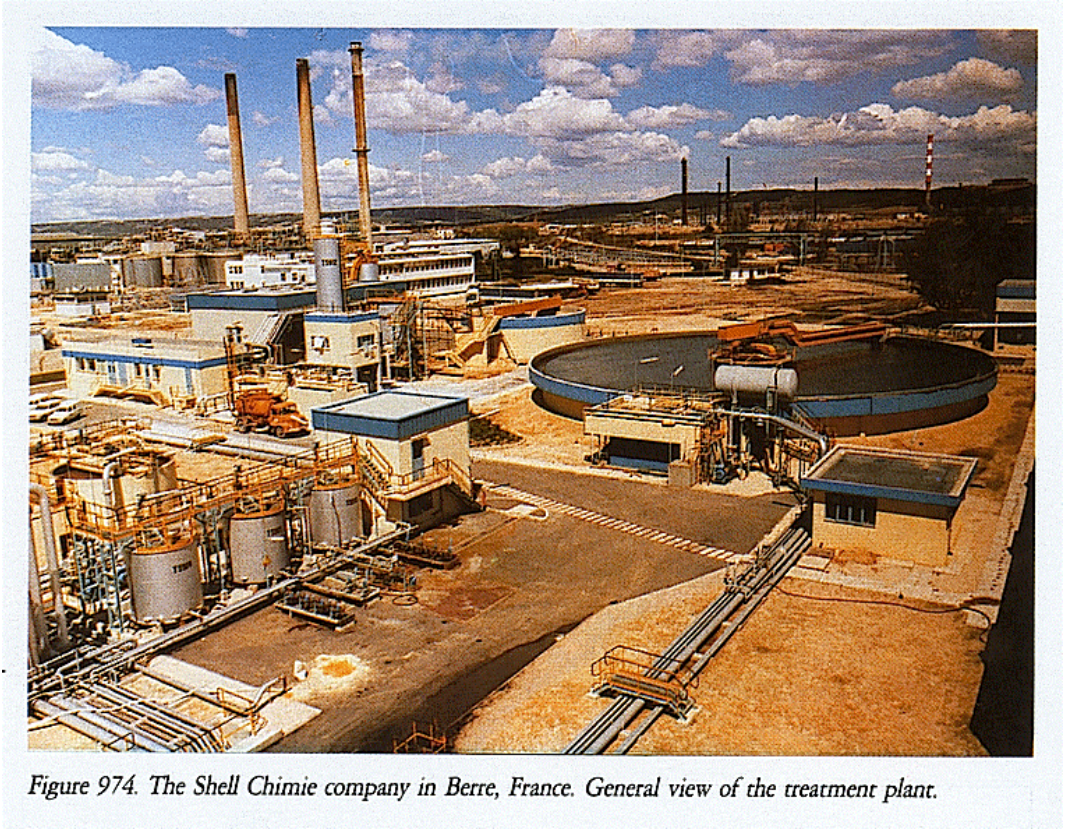


Figure 974. The Shell Chimie company in Berre, France. General view of the treatment plant.

Figure 974. Société SHELL CHIMIE à BERRE (Bouches-du-Rhône). Vue générale de la station d'épuration.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

7. INDUSTRIE TEXTILE

Suivant le rendement d'épuration ou bien à une combinaison des deux. imposé, il peut être fait appel à des traitements physico-chimique ou biologique,

La chaîne de traitement comprend **(figure** 975) les stades décrits ci-après

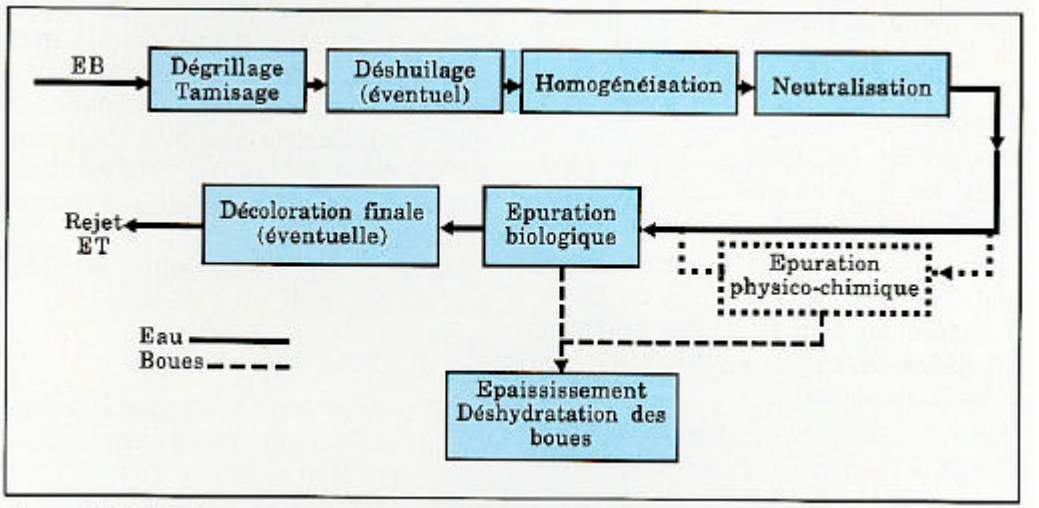


Figure 975. Schéma général du traitement des effluents de l'industrie textile.

7.1. PRÉTRAITEMENTS

- **Dégrillage - tamisage**

La présence de duvet et de bourre de coton impose, à l'aval du dégrillage habituel, la mise en place d'un tamisage fin. Un déshuilage, en cas de présence de fortes quantités de white spirit, peut être nécessaire.

- **Homogénéisation**

Il est impératif de prévoir une capacité tampon dont le volume doit correspondre à 6-12 heures de temps de séjour pour le débit moyen traité, permettant d'étaler sur 24 heures le traitement de rejets généralement produits sur 16 heures (2 postes). Un brassage à l'air de ce bassin est souvent utile.

- **Neutralisation**

Après homogénéisation, le pH des effluents reste généralement alcalin, compris entre 9 et 10. Aussi convient-il de procéder à leur neutralisation. Celle-ci est effectuée soit par l'acide sulfurique soit au moyen de gaz de fumée disponible.

7.2. TRAITEMENTS

7.2.1. Traitement physico-chimique

Ce traitement ne trouve son intérêt que si l'effluent brut contient une grande quantité de MES, des substances toxiques (sulfures, chromates...) ou s'il exige un haut rendement de décoloration. Il peut donc comprendre l'une ou plusieurs des étapes suivantes

- oxydation catalytique des sulfures dans un bassin aéré, avec addition contrôlée de sels de fer ou de manganèse,
- floculation par dosage, dans un réacteur lentement agité, de sels de fer ou d'aluminium, puis ajout d'un polymère organique destiné à améliorer le rendement de décantation,
- clarification par décantation (TURBOCIRCULATOR) ou flottation (FLOTAZUR).

7.2.2. Traitements biologiques

Selon la charge polluante et le rendement d'épuration souhaité, plusieurs schémas sont possibles

- **Lit bactérien suivi ou non d'un décanteur**

Cette technique, la plus simple, permet des rendements d'élimination de DBO_5 compris entre 50 et 70 %. Elle exige cependant une eau brute parfaitement défibrée pour éviter le colmatage du garnissage et, de ce fait, il est préférable de faire précéder le lit bactérien d'un traitement physico-chimique avec floculationdécantation. Après le lit bactérien, un décanteur secondaire est mis ou non en place, selon le rendement recherché.

- **Boues activées**

Compte tenu du type de pollution rencontré, il est préférable de dimensionner l'installation avec une faible charge massique. Le décanteur doit être largement calculé compte tenu de la médiocre décantabilité des BA, que l'on peut attribuer aux teneurs élevées en tensio-actifs des effluents à traiter.

Les rendements d'élimination de DBO_5 sont de l'ordre de 90 à 95 %.

7.2.3. Traitements tertiaires

Ils trouvent leur utilité pour (élimination de la DCO non biodégradable et, en particulier, pour la décoloration. Ces traitements spécifiques peuvent être: précipitation chimique, ozonation, adsorption sur charbon actif...

Il est toujours préférable d'effectuer un essai de traitabilité pour choisir et dimensionner le procédé le plus approprié.

- **Boues**

Les boues produites sont épaissies puis déshydratées, soit par filtre à bandes presseuses (SUPERPRESS ou GD-PRESSE), soit par filtre-presse.

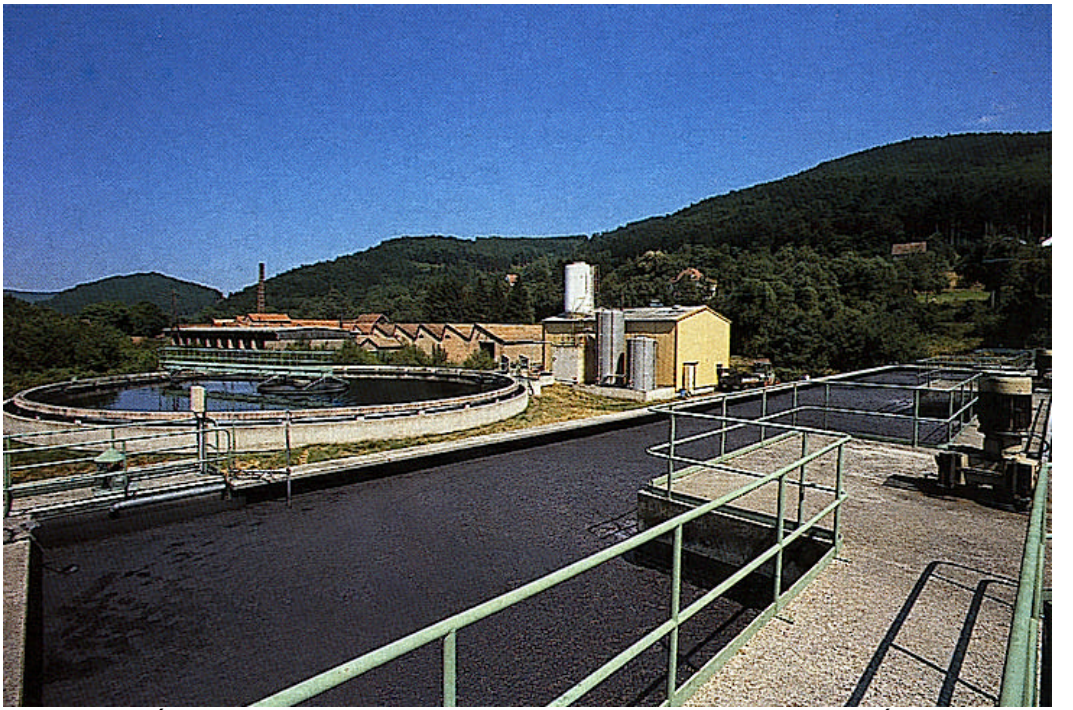


Figure 976. Établissements STEINHEIL-DIETERLIN à ROTHAU (Bas-Rhin). Épuration des effluents de blanchiment, impression et apprêt. Débit: 150 $m^3.h^{-1}$. Vue générale de la station d'épuration.

8. SIDÉRURGIE

Il faut distinguer:

- l'aménagement des grands circuits semi-ouverts de lavage de gaz ou d'arrosage de laminoirs, et le traitement de leurs purges avant rejet; ces eaux sont assez peu polluées,

- le traitement des effluents spécifiques, qui proviennent de la cokerie et du laminage à froid, et présentent au contraire une forte pollution.

8.1. CIRCUITS SEMI-OUVERTS

8.1.1. Cokeries

Ils comportent

- le circuit fermé des eaux ammoniacales, équipé de décanteurs à goudrons,
- le circuit de dépoussiérage à l'extinction du coke, équipé de décanteurs raclés à fines de coke (système DEGRÉMONT), à plan incliné et chaîne, ou pont racleur et grappin (figure 977),
- le circuit de dépoussiérage au chargement, ou de lavage des fumées de préchauffage du charbon (figure 978) avec décanteurs circulaires couverts.

8.1.2. Lavage des gaz de hauts fourneaux

Les traitements possibles sont définis par la figure 9 79 qui comporte principalement une floculation et une séparation dans des décanteurs-épaississeurs avec, éventuellement

Figure 977. SOLLAC à FOS-SUR-MER (Bouches-du-Rhône). Traitement d'eaux d'extinction du coke par décantation. Débit: 2 000 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

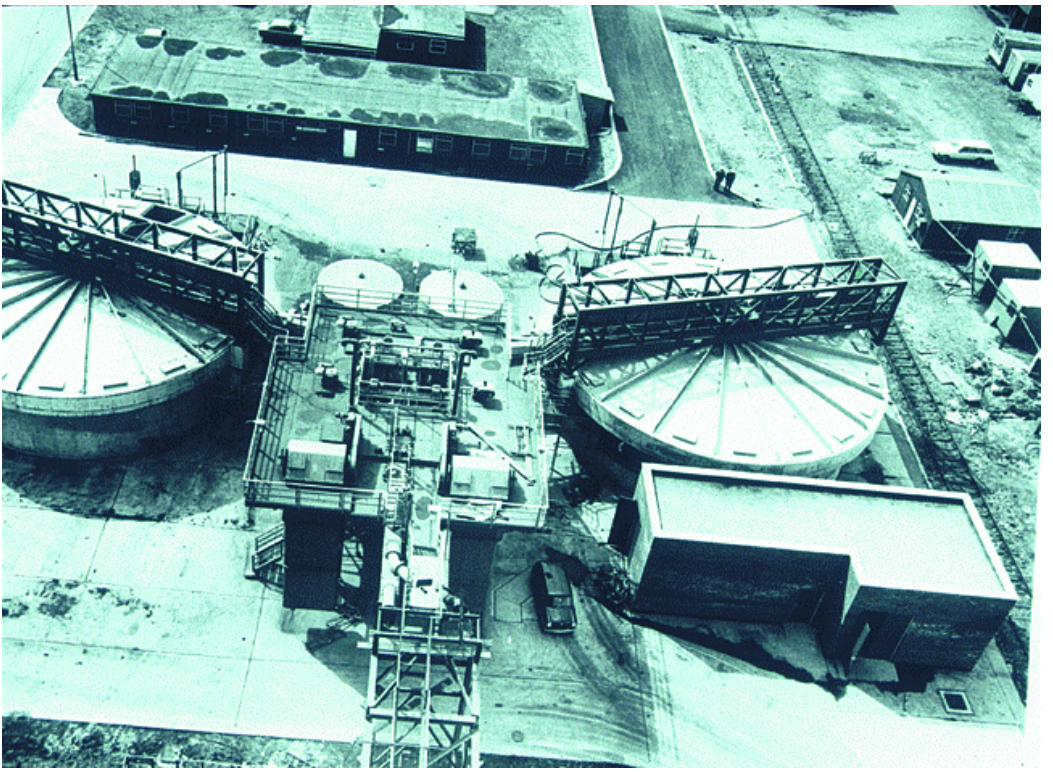


Figure 978. BSC ORGREAVE (Grande-Bretagne). Traitement d'effluents de préchauffage du charbon par décantation. Débit: 150 $m^3.h^{-1}$.

- correction de la dureté bicarbonatée calcique par addition de chaux et recyclage de boues, ou mieux, par addition de NaOH ou $NaHC0_3$,
- préflottation pour l'élimination de "carbon black".

Les purges de déconcentration (dont le filtrat de la déshydratation des boues) sont traitables par neutralisation (élimination des métaux lourds) et par décyanuration (acide persulfurique).

8.1.3. Lavage de gaz de convertisseurs à oxygène

Les traitements possibles sont définis par la figure 980

- prédécantation avec relevage des boues par vis,
- décantation des eaux dans un décanteur-épaississeur après floculation appropriée,
- correction d'alcalinité, soit spontanée (désulfuration de l'acier au Na_2CO_3), soit par addition de Na_2CO_3 en tête de décanteur, avec recyclage (procédé DEGRÉMONT), ceci afin de bloquer la solubilisation néfaste de chaux,
- neutralisation de la purge avant rejet et éventuellement défluoruration ($CaCI_2$).

8.1.4. Coulées continues et laminoirs à chaud

L'efficacité du prédéshuilage dans la fosse à battitures initiale et la qualité de la clarification sont essentielles.

- Les fosses à battitures cylindriques à alimentation tangentielle, se prêtent le mieux à une reprise rationnelle des afflux d'huile irréguliers, par déversement, et des battitures, par grappin.
- La clarification est assurée le plus souvent par filtration sur sable, (filtre FP et FIS ou quelquefois par floculation et décantation rapide (décanteurs TURBOCIRCULATOR ou épaississeurs).

Les effluents de lavage de filtres sont traitables par recyclage vers un décanteur principal, s'il existe, par décantation

Downloaded from https://hydraulics.pot.blogspot.com/

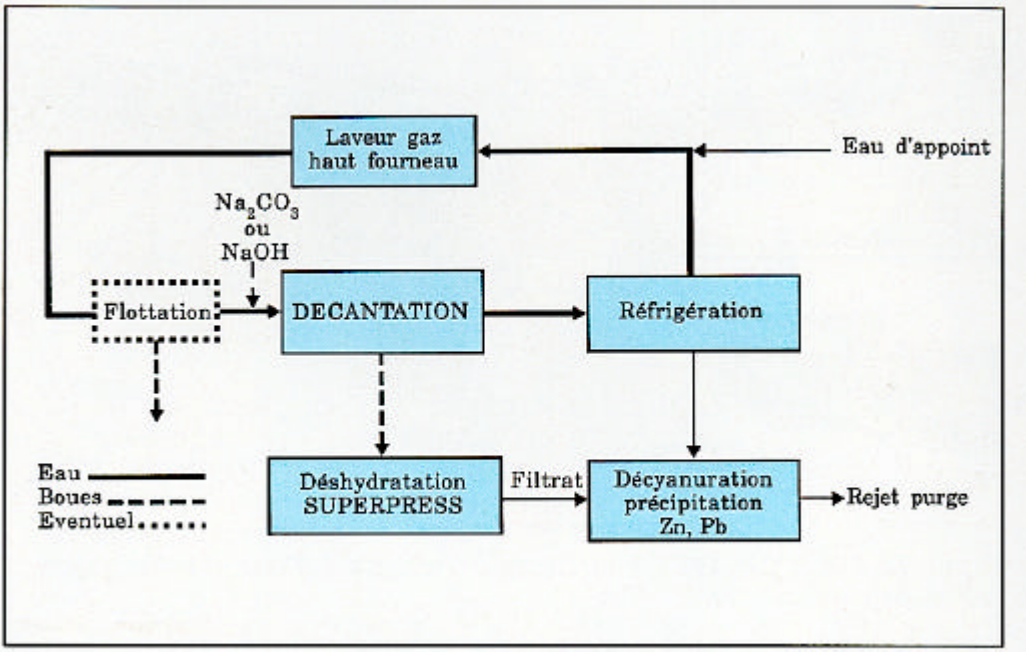


Figure 979. Schéma des circuits des ELG de haut fourneau.

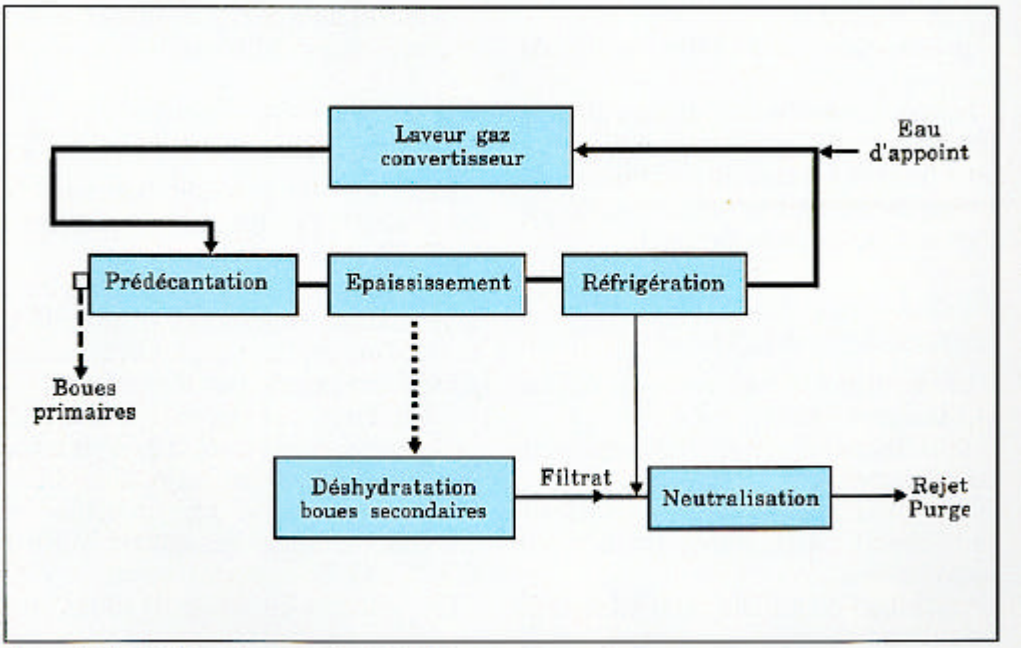


Figure 980. Schéma du circuit des ELG de convertisseur à oxygène.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 981. Complexe sidérurgique COSIPA (Brésil). Traitement des eaux de lavage du convertisseur par décantation.

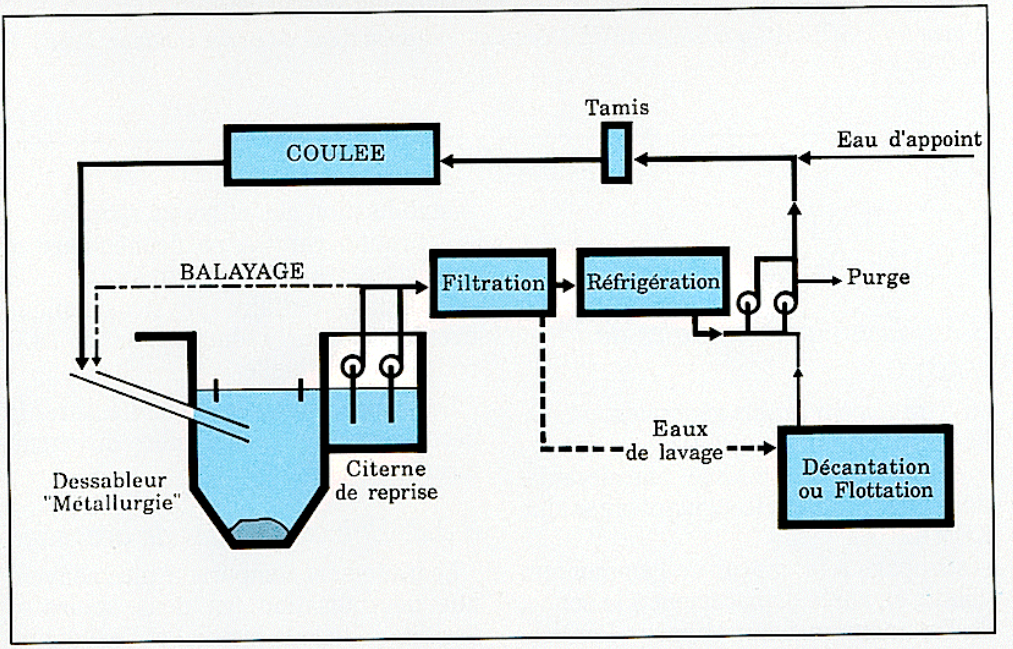


Figure 982. Schéma d'un circuit d'eau d'arrosage de coulée continue.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

en bâchées, ou par flottation (SEDIFLOTAZUR) si les boues sont très huileuses La purge des circuits, effectuée après la filtration ou la décantation requiert rarement un traitement complémentaire avant rejet

Figure 983. SOLLAC à GANDRANGE (Moselle). Filtration d'eau de coulée continue. Débit: 800 m^3 h^{-1}.

8.2. EFFLUENTS SPÉCIFIQUES

8.2.1. Eaux ammoniacales de cokerie

Le traitement le plus généralement réalisé comporte (figure 984)

- dégoudronnage poussé par décantation et par filtration (coagulant organique KEMAZUR),
- strippage à la vapeur de l'ammonium volatil, et, après déplacement à la soude, de l'ammonium fixe (strippeur DEGRÉMONT à garnissage ou plateaux),
- stabilisation des effluents strippés,
- épuration par BA en déphénolage et oxydation des sulfo-cyanures,
- épuration tertiaire physico-chimique éventuelle pour réduction de la DCO colloïdale résiduelle.

Le strippage peut également assurer la déconcentration en NH_4 libre du circuit fermé des ELG.

8.2.2. Effluents acides de décapage

Le traitement comporte le plus souvent une neutralisation (en deux stades si l'acidité initiale le justifie) et l'oxydation de Fe^{2+} par l'air.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

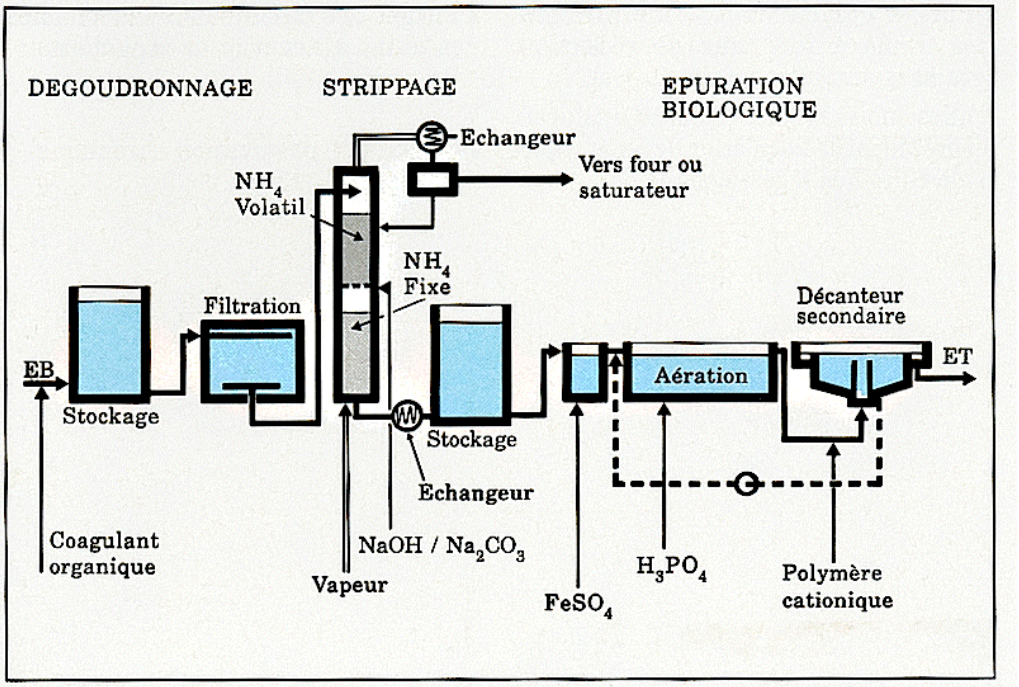


Figure 984. Schéma du traitement d'eaux ammoniacales de cokerie.

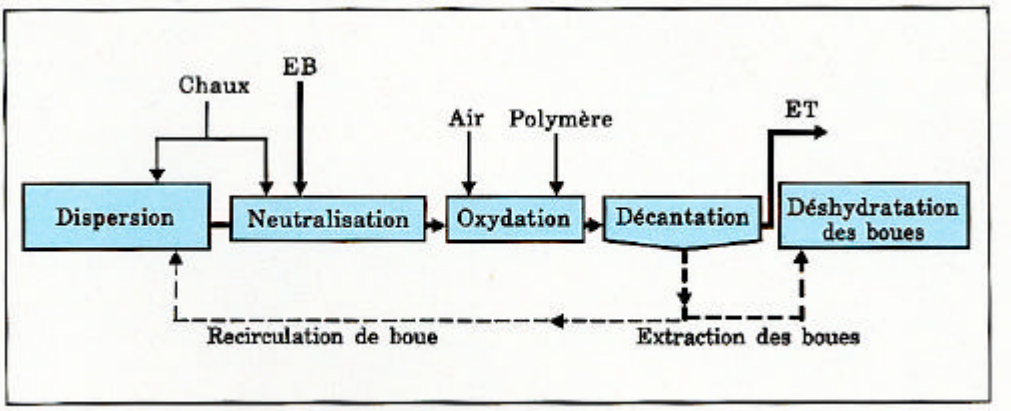


Figure 985. Schéma du traitement d'effluents de décapage.

Les boues précipitées d'hydroxydes ferreux et ferrique sont susceptibles d'une densification selon le schéma de la figure 985.

Cette technique peut mettre en oeuvre les clarificateurs DENSADEG ou TURBOCIRCULATOR.

8.2.3. Effluents de laminage à froid

. **Dégraissage électrolytique**

Après prédécantation, les effluents sont **neutralisés,** floculés (KEMAZUR, ou $FeCl_3$), et flottés.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Purges des circuits de lubrification des trains à fort taux de réduction (graisses animales ou végétales).** Elles subissent un traitement analogue au précédent, la floculation devenant optimale en milieu légèrement acide.

- **Purges des circuits d'huiles solubles des trains à bas taux de réduction**

Voir page 1449

- **Circuits de passivation chromique**

Voir page 1445.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

9. MÉTALLURGIE ET HYDROMÉTALLURGIE

9.1. ALUMINIUM

9.1.1. Production d'alumine

L'élaboration de l'alumine par caustification de la bauxite (procédé BAYER), produit une solution d'aluminate de sodium contenant en suspension les impuretés du minerai (boues rouges); elle est décantée dans des épaississeurs raclés et les boues de fond sont lavées à contre-courants successifs d'eau claire à travers plusieurs décanteurs-laveurs en série (figure 986).

La déshydratation des boues stériles est réalisable par des filtres à bande sous vide. Les techniques de construction d'épaississeurs à entraînement central sont adaptables à la réalisation des divers décanteurs-laveurs en tenant compte de la formation potentielle d'importantes concrétions (extraction périphérique des boues).

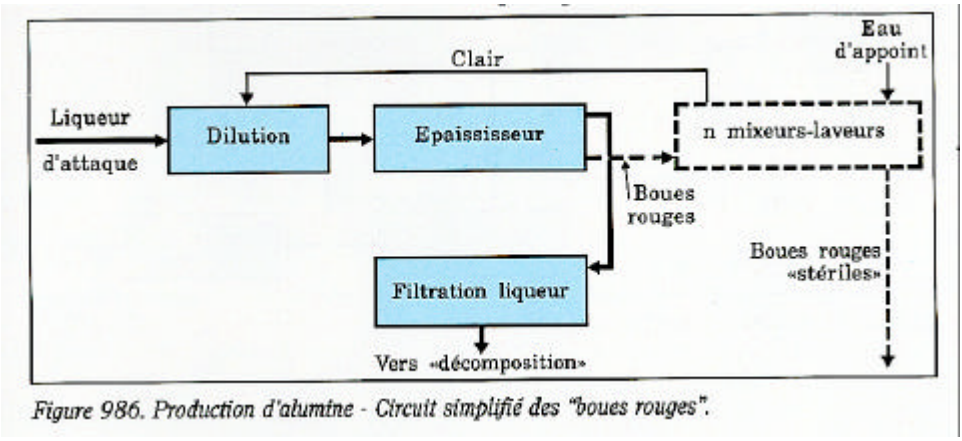


Figure 986. Production d'alumine - Circuit simplifié des "boues rouges".

9.1.2. Eaux «fluorées » d'électrolyse d'alumine

Dans le cas, moins fréquent, où l'épuration des gaz n'est pas assurée par filtration sur alumine (dry process) à la sortie directe de cellules tapotées, mais par un lavage général à l'eau de l'air pollué prélevé sous toiture, un circuit secondaire dérive environ 10 % de l'eau du circuit général et comporte un traitement de précipitation des fluorures par la chaux avec décanteur CIRCULATOR (voir page 152).

9.1.3. Effluents de fabrication d'anodes précuites

Un traitement conjoint de défluoruration et de dégoudronnage est le plus économique, mais ne permet pas d'optimiser les éliminations des deux polluants comme le ferait une flottation à pH naturel, avec coagulant KEMAZUR, suivie d'une défluoruration seule à la chaux.

9.1.4. Effluents de lavage des brusques (cadres de cathodes)

Ils sont alcalins. Ils doivent subir une

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

décyanuration au chlore, suivie d'une neutralisation et d'un apport de $CaCl_2$ pour assurer la défluoruration.

9.1.5. Coulées d'aluminium et laminage à chaud

Les circuits s'enrichissent en huiles, graisses et en détritus divers (bois, fibres, plastiques, poussières). Le circuit étant alimenté en eau adoucie, sinon peu minéralisée, l'eau doit être maintenue à un pH de moindre corrosivité et subir un traitement de déshuilage (FLOTAZUR) qui déconcentre en permanence les huiles (figure 987).

En laminage à chaud, l'eau du circuit est en général constituée par une émulsion vraie et sa purge doit subir une épuration par cassage (voir page 1450).

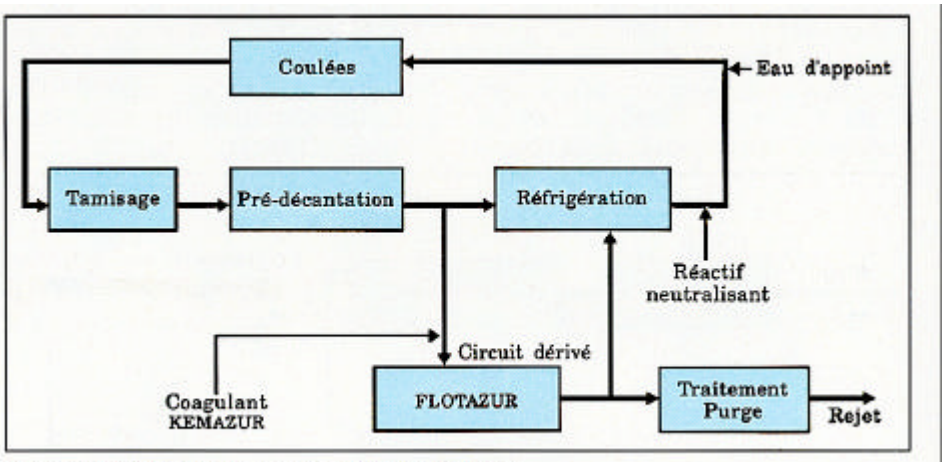


Figure 987. Schéma de circuit de coulées d'aluminium.

9.2. ZINC ET PLOMB

9.2.1. Effluents de grillage de la blende (ELG)

Après récupération éventuelle du sélénium et du mercure par filtration, ces eaux particulières (dégazage de H_2) sont neutralisées à la chaux (en deux stades) et décantées avec un recyclage de boues, ce qui assure la précipitation des sulfates et des fluorures (voir page 1419).

Un deuxième stade de décantation, à pH plus élevé, peut permettre d'éliminer Pb et Zn, et de récupérer des boues plus riches en ces métaux.

9.2.2. Effluents généraux

Dans les usines où une partie importante du procédé est assurée par lixiviation en voie acide, et où certains effluents sont prétraités dans les ateliers, les effluents finaux sont dilués et représentent un débit important. Ils sont traités par neutralisation et décantation en un stade. L'utilisation d'unités compactes du type DENSADEG RI, permet d'obtenir des rendements élevées d'élimination des métaux lourds (figure 988).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

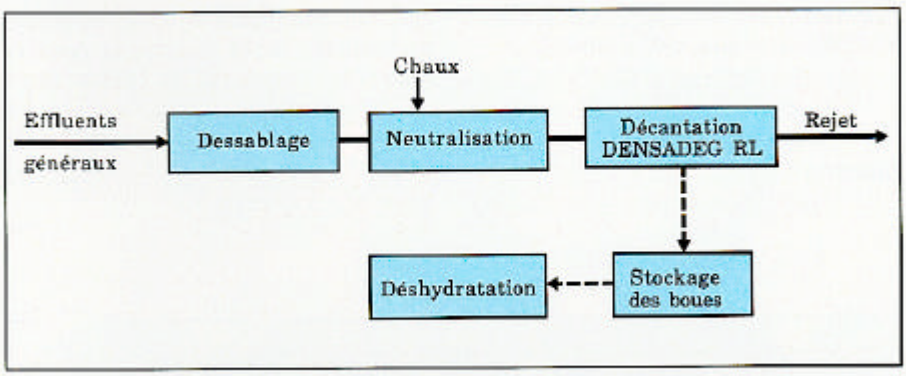


Figure 988. Schéma de traitement des effluents généraux de production de Zn et Pb.

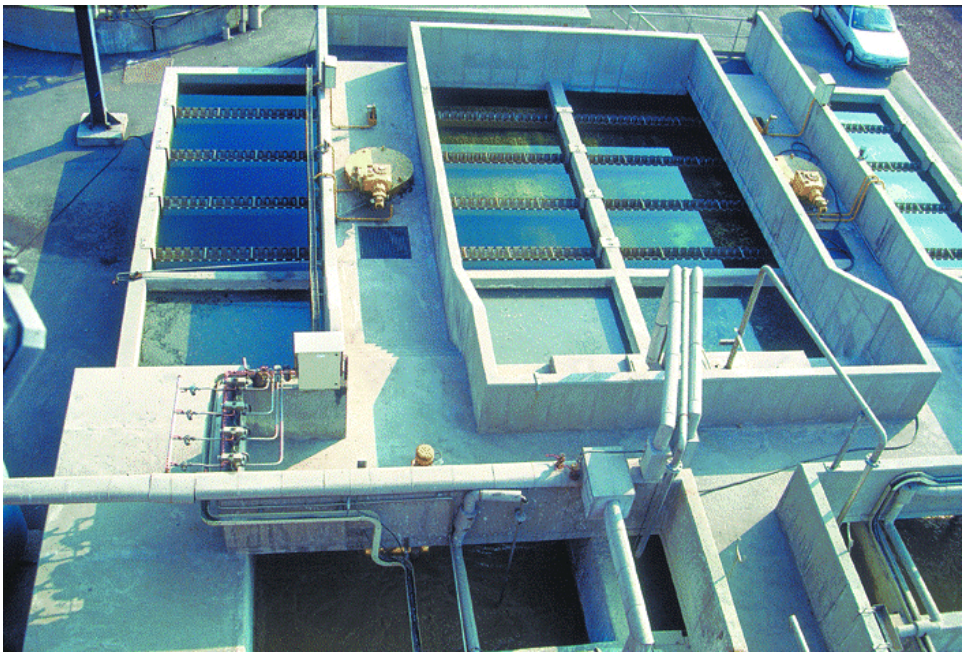


Figure 989. MÉTALEUROP à NOYELLES-GODAULT (Pas-de- Calais). Épuration des effluents par 1 élimination de Pb, Zn et Cd. Débit: 2 000 $m^3.h^{-1}$. Vue générale de la station.

9.3. HYDROMÉTALLURGIE (Ur, Au, Cu, etc.)

Les techniques du traitement des eaux peuvent être appliquées en plusieurs circonstances:

a) Procédés - lors de (extraction et de la préparation des minerais,

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- à l'extraction même du métal (attaques alcalines ou acides, extractions...),
- par échange d'ions ou liquide/liquide).

b) Sur les effluents des unités précédentes

La figure 990 schématise les circuits hydrométallurgiques et montre les points particuliers où ces techniques peuvent réaliser ou améliorer un stade du procédé.

9.3.1. Procédé

9.3.1.1. Clarification de jus uranifère après filtres à bande

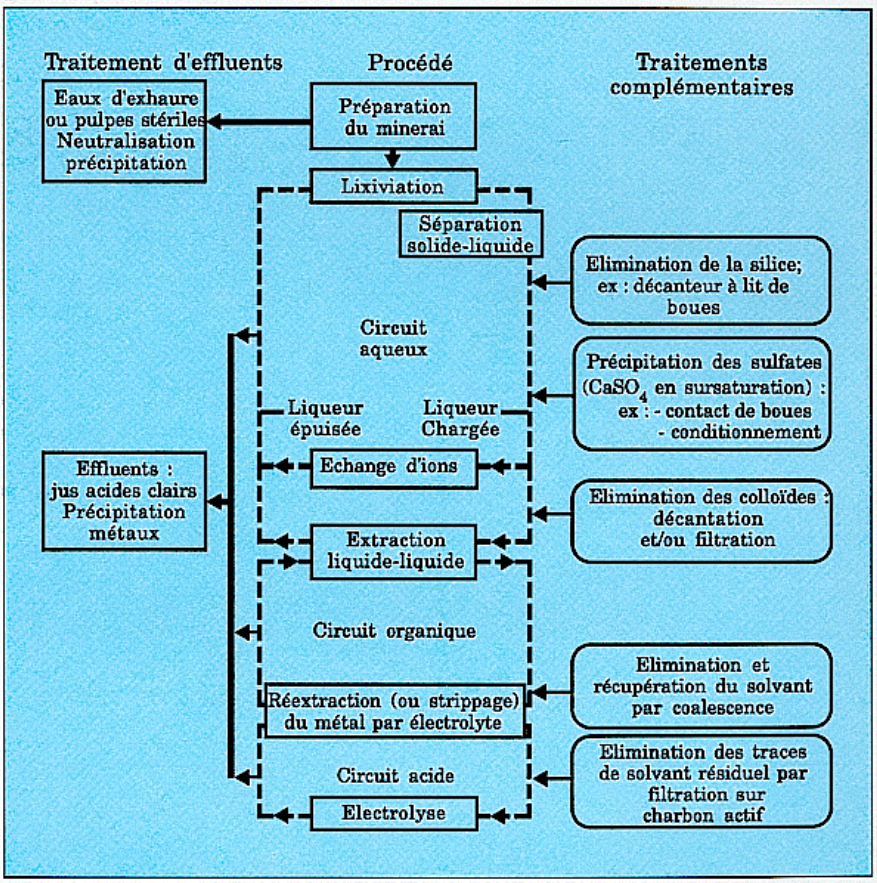


Figure 990. Schéma de l'amélioration de circuits hydrométallurgiques et du traitement des effluents.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Elle peut être réalisée selon la, figure 991.

9.3.1.2. Extraction par échange d'ions

Elle est généralement assurée sur des jus clairs de façon classique à travers une batterie d'échangeurs utilisés à saturation et en permutation cyclique.

Sur des pulpes indécantables, rencontrées notamment avec des minerais d'uranium alcalins, l'extraction et la régénération doivent être réalisées chacune, soit à contre-courant d'une série de réacteurs contenant de la résine en pulpe, soit dans un lit fluidisé multi-étagé ascendant DEGRÉMONT (figure 992). Dans ce dernier cas, la régénération de la résine peut s'effectuer en continu suivant la technique ECI.

9.3.1.3. Récupération de solvant après extraction et recyclage d'acide

La liqueur épuisée, après extraction par solvant, peut contenir jusqu'à 100 à 150 $mg.l^{-1}$ de solvant (kérosène). Le schéma

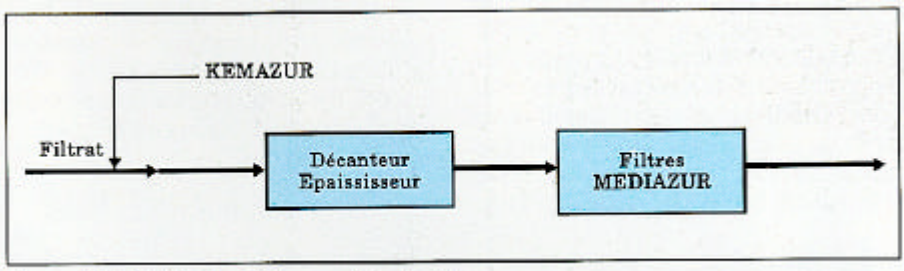


Figure 991. Clarification de jus uranifère alcalin.

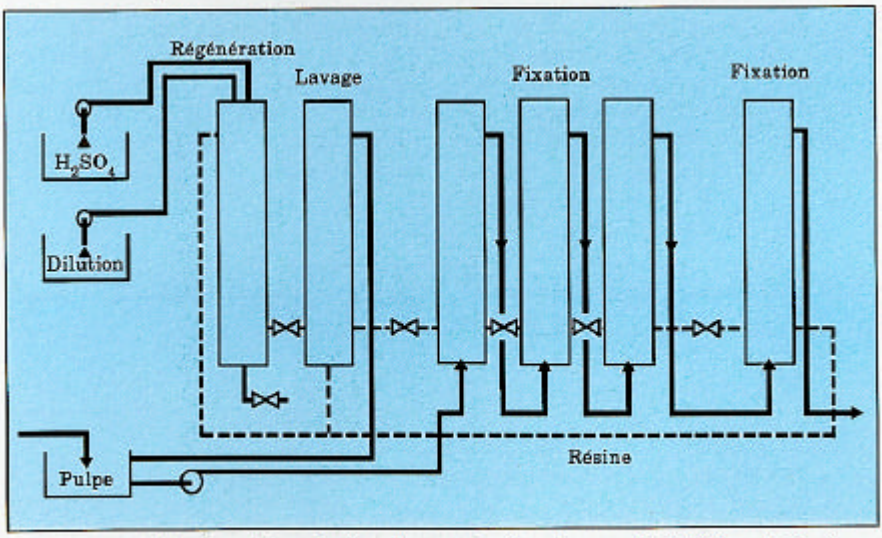


Figure 992. Schéma de principe de pilote d'extraction d'uranium sur lit fluidisé multi-étagé DEGRÉMONT, COGEMA à BESSINES (Deux-Sèvres).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

de la figure 993 permet soit de récupérer le solvant, soit de recycler l'acide sulfurique en amont de la lixiviation. Ce traitement réduit aussi la DCO de l'effluent final.

9.3.1.4. Élimination des matières organiques

Celles-ci posent des problèmes soit en raison de leur adsorption irréversible sur le charbon actif (extraction du complexe cyanure/or), soit en diminuant le rendement d'une électrolyse finale (Cu, Zn). Quand elles proviennent, non pas de l'eau d'appoint, mais du minerai, des éliminations sélectives sont envisageables en cours de procédé (coagulants particuliers, ozone) mais ne peuvent être confirmées que par des études sur stations pilotes.

9.3.2. Effluents

Les eaux d'exhaure de mines, acides (oxydation biologique du soufre), doivent, avant rejet, être déferrisées et neutralisées dans des installations souterraines aussi compactes que possible (DENSADEG ou TURBO-CIRCULATOR).

Le schéma est semblable à celui des effluents acides de décapage (page 1437).

Les effluents stériles et acides de lavage des fines et les éluats plus acides de régénération des échangeurs d'ions sont neutralisés à la chaux et au carbonate de calcium, oxydés par aération, et décantés, comme précédemment, mais avec neutralisation en deux stades, en raison de leur plus forte acidité.

Les effluents faiblement radioactifs, d'origines diverses (exhaure, lavage, etc.) sont épurés par précipitation du radium avec addition de baryum et de coagulant. Le traitement est réalisable avec le DENSADEG RP ou RL, précédé d'un réacteur de prémélange adapté aux différents réactifs mis en oeuvre

9.3.3. Déshydratation des boues

Le déclin des possibilités d'épandage en lagune, et le transport des boues à plus ou moins longue distance, imposent leur déshydratation fréquente. Le mode le plus économique de déshydratation est la filtration à bande presseuse, qui peut être assurée par le SUPERPRESS H.D.

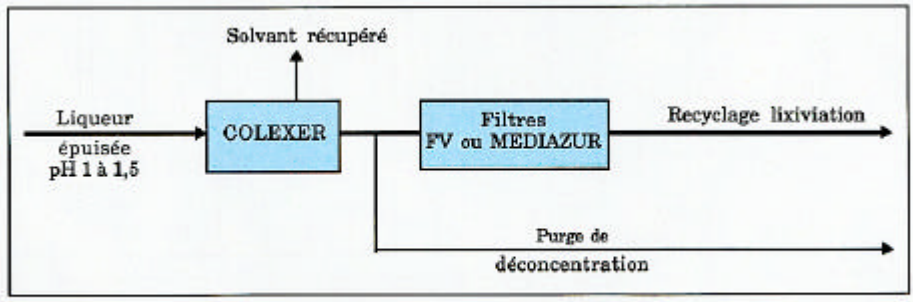


Figure 993. Élimination des solvants résiduels par coalescence.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

10. TRAITEMENTS DE SURFACE

Tout schéma de traitement doit obligatoirement être précédé d'une investigation des ateliers afin d'optimiser les débits des eaux de rinçage, et d'envisager les récupérations des matières premières par tout où cela est possible (voir page 113). Les chaînes de traitement s'articulent selon deux grandes voies, le recyclage et le traitement en circuit ouvert (détoxication), qui peuvent s'imbriquer plus ou moins.

10.1 LE RECYCLAGE

Il permet de recycler les eaux de rinçage, après épuration sur échangeurs d'ions, à l'exclusion des eaux dirigées vers la détoxication car contenant des cyanures et/ou de fortes teneurs en graisses ou hydrocarbures.

La figure 994 rassemble les principales possibilités de circuit fermé.

Les échangeurs peuvent être installés à poste fixe, avec régénération in situ, technique valable pour de grosses installations, ou être « mobiles» et envoyés en régénération dans un centre agréé. Cette technique est valable pour de petites installations (volume maximal de résine 2001), et nécessite de disposer en permanence d'un jeu d'échangeurs régénérés.

Quelle que soit la technique employée, le recyclage a un double rôle de récupération (réutilisation de l'eau) et de concentration de la pollution. Il doit donc être systématiquement complété par un traitement de détoxication.

Les avantages du recyclage sur échangeurs d'ions sont

- diminution importante de la consommation d'eau,
- production d'une eau de très grande pureté, à prix réduit, avec amélioration de la qualité du rinçage,
- concentration de la pollution (traitement aval d'un moindre débit),
- récupération de certains produits coûteux (or, argent, chromate),
- stabilisation des bains chromiques.

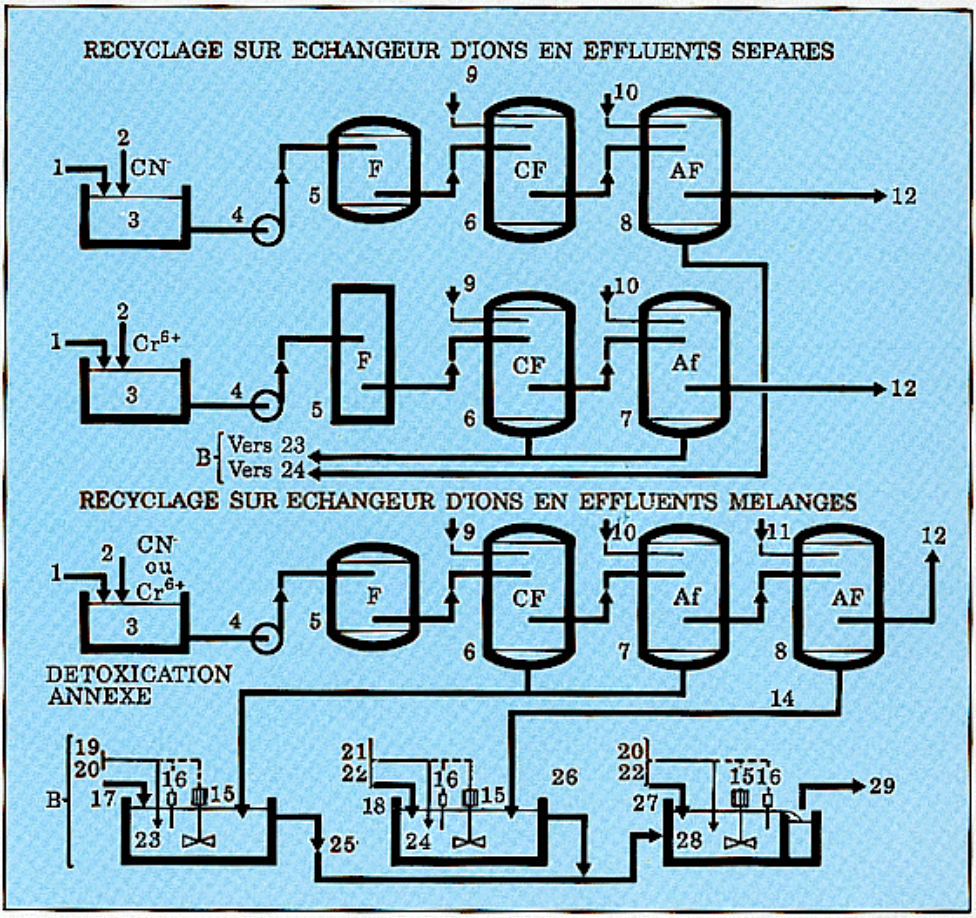
La récupération des métaux nobles, ou de grande toxicité, peut également être effectuée par électrolyse en continu d'un bain de rinçage mort Cette technique concerne plus particulièrement l'or, l'argent, le cadmium, le cuivre.

10.2. LA DÉTOXICATION

Celle-ci est également appelée traitement en circuit ouvert ou à eau perdue.

Tous les schémas d'installation ne peuvent être répertoriés ici, mais ils se résument en un certain nombre de fonctions élémentaires (voir figure 996) et font appel aux réactions d'oxydation, de réduction, de neutralisation, puis de précipitation, des hydroxydes métalliques et divers toxiques (voir pages 258 et 260).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/



1 – *Eau brute d'appoint.*
2 – *Effluent pollué à traiter sur échangeurs.*
3 – *Bac de reprise.*
4 – *Poste de pompage.*
5 – *Poste de filtration.*
6 – *Échangeur de cations fortement acide.*
7 – *Échangeur d'anions moyennement basique.*
8 – *Échangeur d'anions fortement basique.*
9 – *Régénérant acide.*
10-11 – *Régénérant alcalin.*
12 – *Distribution d'eau déminéralisée recyclée.*
13 – *Éluats de régénération C + Af (toxique).*
14 – *Éluats de régénération AF (toxique).*
15 – *Groupes électro-agitateurs d'homogénéisation.*
16 – *Régulation de pH et rH.*
17 – *Vidange des bains usés chromatés et acides.*
18 – *Vidange des bains usés cyanurés et alcalins.*
19 – *Injection de réducteur.*
20 – *Injection d'acide.*
21 – *Injection d'oxydant.*
22 – *Injection d'alcalinisant.*
23 – *Déchromatation automatique en cuvée.*
24 – *Décyanuration automatique en cuvée.*
25-26 – *Transfert des concentrés et semi-concentrés détoxiqués.*
27 – *Effluents alcalins et acides non recyclés.*
28 – *Poste de neutralisation automatique.*
29 – *Vers floculation et décantation.*

Figure 994. Traitement en circuit fermé.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

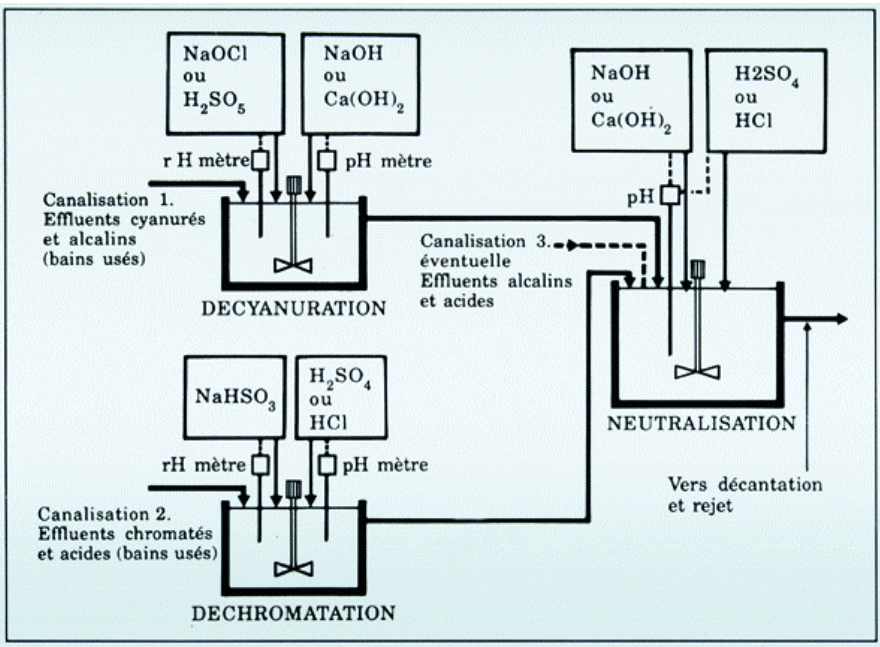


Figure 996. Schéma de principe d'une installation classique de détoxication en traitement continu et automatique (circuit ouvert).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

L'utilisation de TURBACTORS, réacteurs mélangeurs rapides, en enceinte fermée sous pression, permet de réduire les temps de réaction par rapport aux systèmes classiques, et de réaliser des installations plus compactes (figure 997).

Suivant l'importance du débit et la place disponible, la séparation des différents hydroxydes précipités peut s'effectuer dans des décanteurs statiques ou des décanteurs lamellaires (SEDIPAC). La déshydratation des boues extraites est souvent effectuée par filtre-presse.

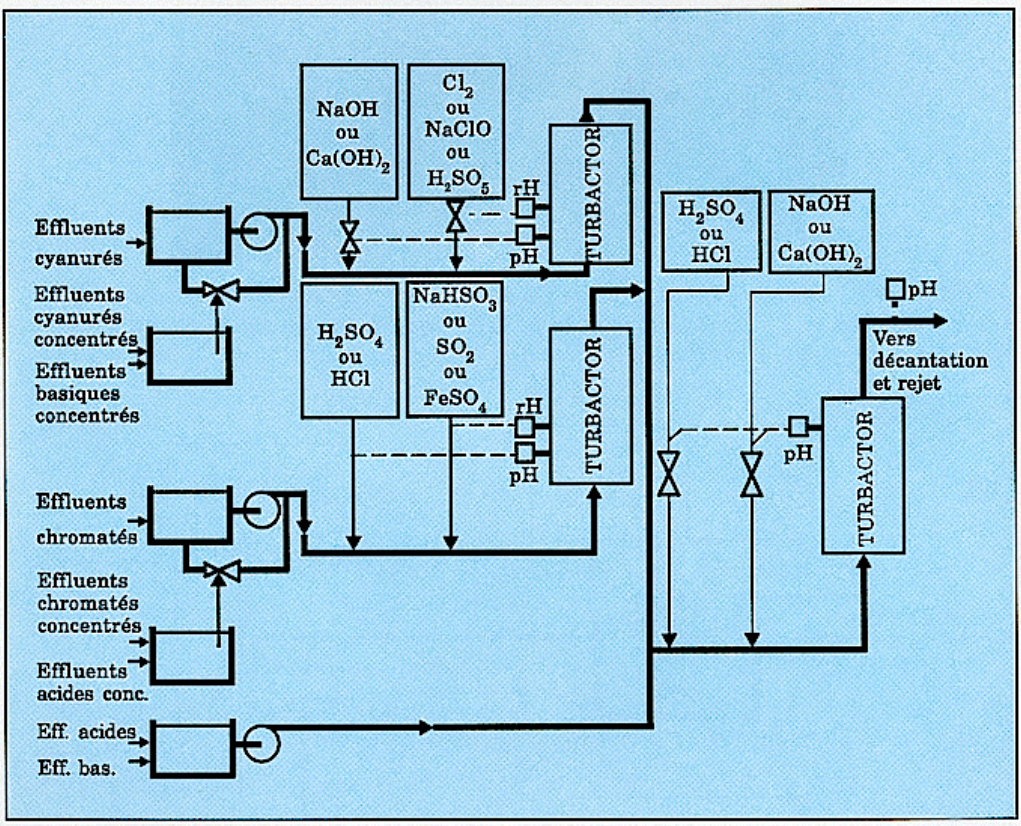


Figure 997. Schéma de principe d'une installation de détoxication en traitement continu et automatique par TURBACTOR (circuit ouvert).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 998. Établissements ACR à ROANNE (Loiret. Épuration d'eaux de décapage, dégraissage, phosphatation et préparation de surface. Débit: 30 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

11. INDUSTRIES AUTOMOBILE ET MÉCANIQUE

11.1 ENTRETIEN DES CIRCUITS DE FLUIDES AQUEUX DE COUPE

Il est assuré pour la plupart des opérations d'usinage par - dessablage et filtration sur papier à déroulement continu sous pression, ou, plus fréquemment, sous vide.

Pour la rectification, qui est plus exigeante en qualité, il peut être assuré par - filtration sur bougies à précouche de diatomées,
- floculation et flottation à l'air dissous. Dans toutes ces opérations, l'huile relarguée à la surface des cuves de stockage et mélangée à des oxydes, est enlevée par des tambours magnétiques.

11.2 DESTRUCTION DES FLUIDES AQUEUX

11.2.1. Émulsions

Les procédés dépendent de la concentration et de la nature des fluides. Pour les émulsions, plusieurs techniques sont possibles

- **cassage à chaud** (65-80° C) en voie **acide, à pH 1- 2**, en présence d'un agent relargant (Al, Fe), avec séparation des huiles par décantation naturelle ou centrifugation, puis finition par FAD (figure 999).

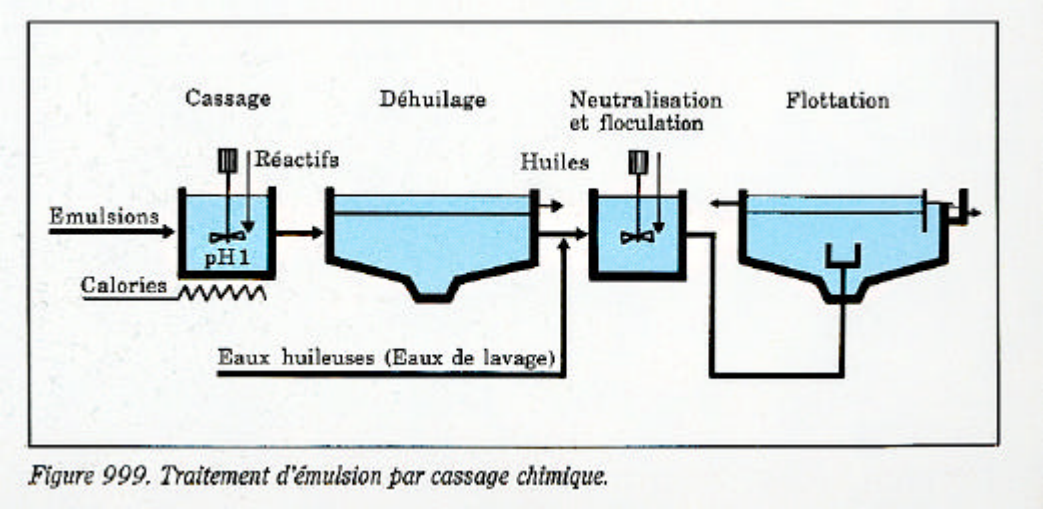


Figure 999. Traitement d'émulsion par cassage chimique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

- **Floculation à froid à pH 7-8 au moyen de $CaCl_2$, $A1^{3+}$ et Na_2CO_3** avec précipitation de $AI(OH)_3$ et de $CaCO_3$, décantation, et finition par FAD.

- **Floculation à froid à pH 5-6 avec un coagulant organique** type KEMAZUR, décantation et finition par FAD. Ce procédé, non générateur de boues, concerne des émulsions peu concentrées (figure 1000).

- **Ultrafiltration,** procédé évitant l'emploi de réactifs, restituant un concentrat contenant de 30 à 50 % d'huiles et exploité par bâchées (figure 1001) ou en continu.

11.2.2. Fluides semi-synthétiques, plus pauvres en hydrocarbures

Les dispositions précédentes restent valables, mais les traitements physico-chimiques qui permettent un abattement de DCO de 60 à 75% dans le cas d'émulsions, n'assurent quiet abattement de 30 à 50 % sortes fluides semi-synthétiques. Ces traitements peuvent être suivis d'un traitement complémentaire: osmose inverse, épuration biologique après forte dilution et si la toxicité est faible.

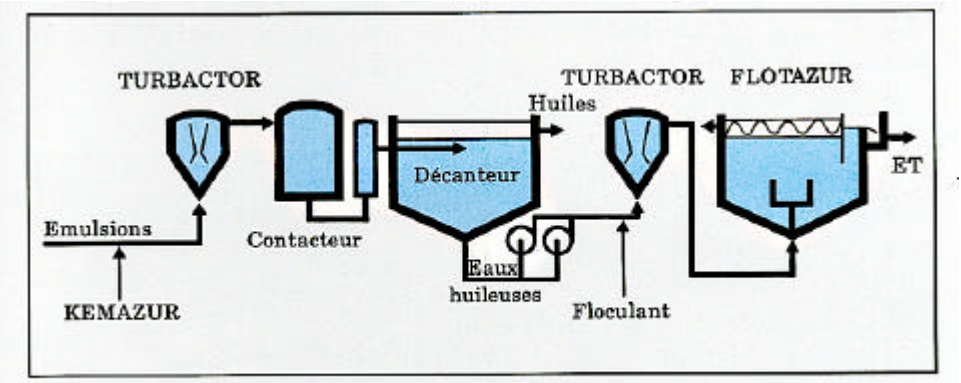
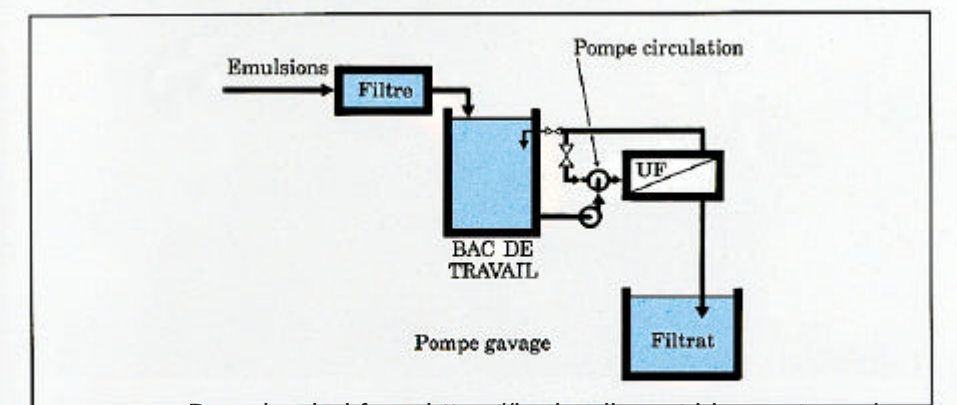


Figure 1000. Traitement d'émulsion par coagulant organique (procédé KEMAZUR).



Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 1001. Traitement d'émulsion en bâchées par UF.

11.2.3.
Fluides synthétiques

La destruction par évaporation et/ou incinération demeure la seule disposition possible

11.3. CABINES DE PEINTURE

La floculation des effluents des cabines de peinture conventionnelles et par anaphorèse, s'effectue le plus souvent par floculation massive au sulfate d'aluminium, et séparation du floc par FAD (FLOTAZUR).

Les peintures par cataphorèse posent deux difficultés particulières, liées à la présence de plomb et aux forts à-coups de pollution lors de l'arrêt de l'unité d'UF, qui peuvent nécessiter de diluer l'effluent Un agent neutralisant est nécessaire.

La siccité des boues de flottation varie de 6 à 12 % suivant le type de peinture. Les boues évoluant, leur concentration s'accroît par polymérisation après extraction hors du flottateur. L'eau flottée est très claire mais, suivant les formulations, peut encore présenter une DCO résiduelle de 2à5 $g.l^{-1}$

Figure 1002. BMW AG à MUNICH (RFA). Traitement des effluents de cabines de peinture. Débit. 10 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

12. INDUSTRIE DES ENGRAIS

12.1. PRODUCTION D'ACIDE PHOSPHORIQUE ET DE SUPERPHOSPHATES

Le traitement a pour buts principaux la neutralisation de l'acidité et la précipitation des fluorures et phosphates.

En raison des fortes acidités présentes, le traitement doit s'effectuer en deux stades de neutralisation et précipitation (figure 1003)

- 1e` stade à pH 4, par addition de chaux ou, sous certaines précautions, de $CaC0_3$, assurant la précipitation de CaF_2 et de $CaHP0_4$. Le précipitat étant cristallin, la réaction peut être assurée dans un décanteur à recyclage type TURBOCIRCULATOR ou DENSADEG RP,
- 2e stade à pH 8,5 - 9, par seule addition de chaux et avec la précipitation massive de boues hydrophiles de silico-aluminates et de $Ca_3(P0_4)_2$. Le volume de boues à épaissir peut inciter au choix d'une décantation en lagune plutôt qu'en décanteur-épaississeur. La précipitation de 3 $Ca_3(PO_4)_2$, CaF_2 (ffuoro-apatite), permet d'obtenir des teneurs résiduelles en) F^- inférieures à 10 $mg.l^{-1}$.

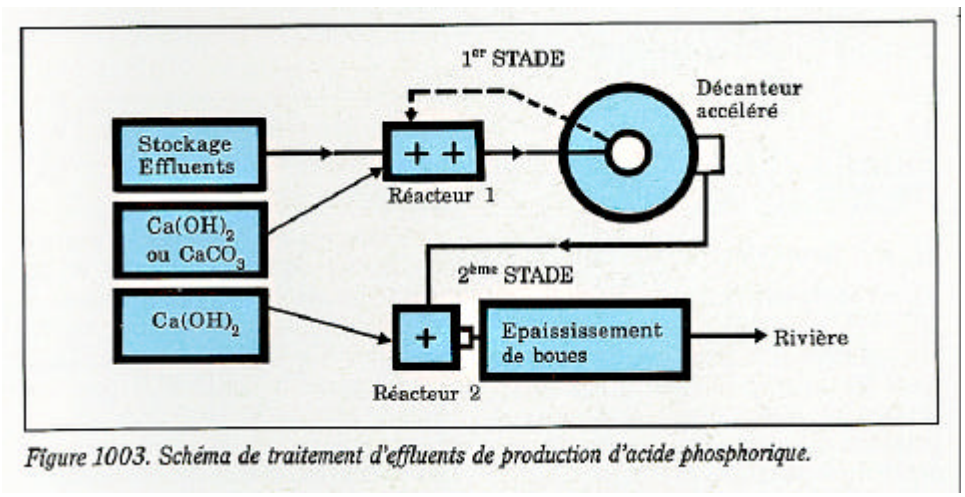


Figure 1003. Schéma de traitement d'effluents de production d'acide phosphorique.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Figure 1004. Usine de production d'acide phosphorique et engrais VALEFERTIL (Brésil). Traitement des effluents. Débit: 300 $m^3.h^{-1}$.

12.2. PRODUCTION D'ENGRAIS AZOTÉS

12.2.1. Ammoniac

Les condensats, riches en $(NH_4)_2\ CO_3$ et $NH_4\ HC0_3$,sont dégazés, refroidis, et traités sur résines cationiques. Ils peuvent alors être réintégrés dans la chaîne de production d'eau déminéralisée d'appoint aux chaudières qui acceptent la présence de méthanol.

12.2.2. Fabrication d'urée

Les condensats peuvent subir une hydrolyse à la vapeur sous 20 bars (avec recyclage de NH_3 en procédé) ou un lavage évaporatif, qui permettent de réduire considérablement leurs teneurs en urée (50 à 300 $mg.l^{-1}$) et en NH_4 (25 à 3 $mg.l^{-1}$). Ils sont alors traitables par voie biologique (nitrification-dénitrification).

12.2.3. Nitrate d'ammonium

Le traitement des condensats comporte une filtration ou une clarification (si les eaux de lavage des sols sont jointes) et une déminéralisation réalisable en lits fixes (procédé UFD) ou par échange d'ions continu (procédé ECI) pour les débits de plus de 50 -100 $m^3.h^{-1}$. .;

Les taux de régénération sont respectivement environ 180 % et 250 % des théoriques pour les résines cationique et anionique.

Selon la concentration possible de l'acide nitrique de régénération, la teneur en NH_4N0_3 des éluats concentrés varie de 15 à 20 %. L'évaporation complémentaire de concentrats pouvant contenir des composés organiques ou des métaux lourds est à prohiber (risque d'explosion, etc.).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Les schémas envisageables sont présentés aux figures 1005 et 1006

12.2.4. Fabrications associées

Certaines usines peuvent fabriquer des engrais complets NPK, ou simultanément de forée et des ammonitrates. Si (échange d'ions constitue la voie principale de récupération de NH_4 et $N0_3$, un traitement par strippage du NH4 libre est envisageable si la concentration en est assez élevée et le recyclage des buées possible. En finition, on assure l'oxydation biologique de l'ammonium et éventuellement l'élimination des nitrates (apport de nutriment organique nécessaire). Le schéma de la figure 1007 montre une articulation possible des prétraitements et traitements.

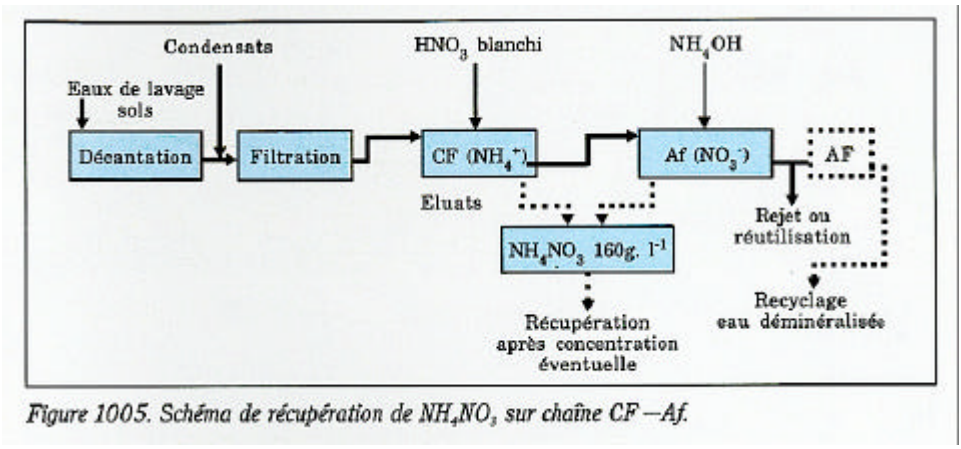


Figure 1005. Schéma de récupération de NH_4NO_3 sur chaîne CF—Af.

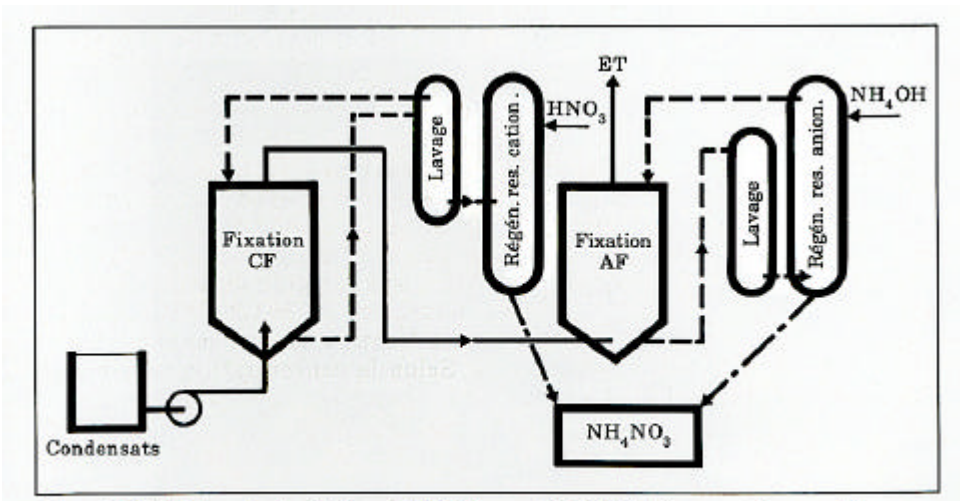


Figure 1006. Schéma de récupération de NH_4NO_3 avec déminéralisation en continu sur chaîne — DEGRÉMONT ECI.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

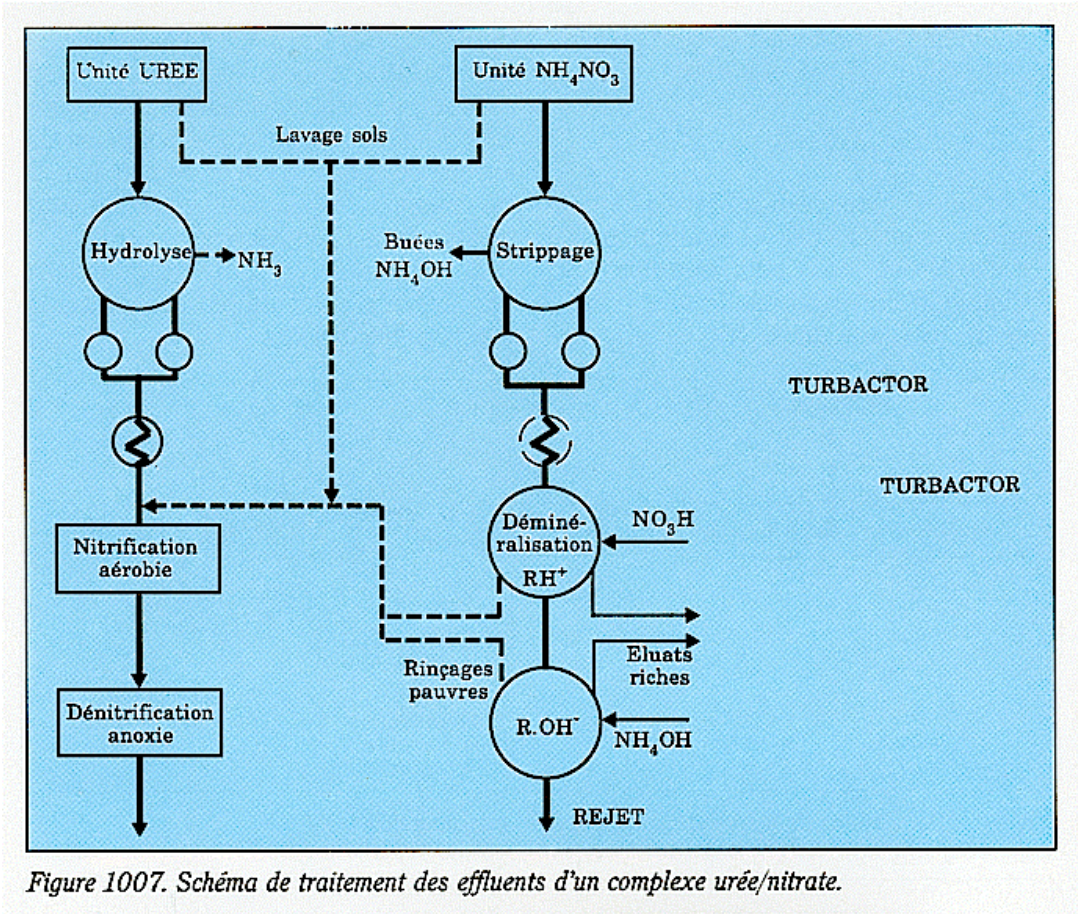


Figure 1007. Schéma de traitement des effluents d'un complexe urée/nitrate.

Figure 1008. ORKEM à NANGIS (Seine-et-Marne). Recyclage de condensats ammoniacaux. Débit: 120 $m^3.h^{-1}$.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

13. INDUSTRIE NUCLÉAIRE

Le choix des traitements est fixé par le niveau initial de radioactivité des effluents, par le facteur de décontamination (FD) et par la nocivité du rayonnement de chaque radionucléide. Le FD est maximal par l'évaporation qui est appliquée sur des effluents de faible débit et de concentration en sels réduite.

Les traitements physico-chimiques (figure 1009) qui sont aptes à traiter des débits élevés d'eaux peu actives, peuvent éliminer, outre les MES, une fraction notable d'éléments radioactifs solubles en combinant la précipitation d'hydroxyde de fer à celle d'autres réactifs. Ceux-ci, appelés entraîneurs, peuvent être: ferrocyanures de Cu ou de Ni, $CaC0_3$, tanates, phosphate de calcium, Bat^{2+}, etc. Les FD sont très variables et quelquefois assez faibles.

L'échange d'ions, mis en oeuvre avec des résines non régénérées, permet de figer les produits de corrosion et les éléments radioactifs dissous à des concentrations plus élevées. Il permet d'assurer un FD couramment supérieur à 100.

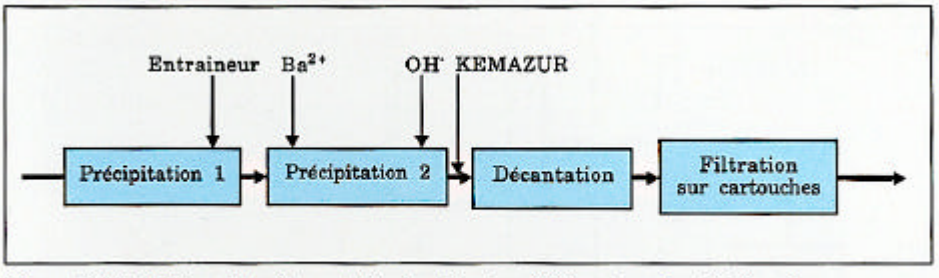


Figure 1009. Schéma de traitement physico-chimique d'effluents radioactifs chargés.

13.1. CENTRALES NUCLÉAIRES PWR

13.1.1. Eaux du circuit primaire (page 55)

Leur traitement (RCV) est constitué par deux systèmes à résines non régénérées (figure 1010)

- une régulation du lithium (résines lithiées), comportant un LM avec résine cationique sous forme Li (1-régulation du pH) et un CF sous forme H^+ (2 - fixation du Li excédentaire),
- une régulation du bore, comportant un AF sous forme OH^- (3 -fixation de l'acide borique excédentaire).

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

13.1.2. Traitement des effluents primaires (TEP)

Il comporte

- un système de décontamination des particules de corrosion ou d'activation avec (CF + LM), à résines non régénérées,
- un évaporateur qui accepte entre 300 et 1300 $mg.l^{-1}$ de bore et concentre celuici qui est recyclé éventuellement Le condensat est aussi recyclable, si nécessaire, en appoint au circuit primaire.

13.1.3. Purges du circuit secondaire (APG)

Elles sont envoyées sur une chaire comportant une filtration sur cartouches, un (CF + AF), non régénéré, avant d'être recyclées (ou rejetées).

13.1.4. Circuit de la piscine «gaines» (PTR)

Les eaux peu chargées en MES sont recyclées sur une chaire comportant une filtration à cartouches et un LM.

13.1.5. Eaux de service (TEU)

Les effluents liquides usés sont décontaminés en fonction de leur salinité

- jusqu'à une certaine teneur en sodium (de 20 à 50 $mg.l^{-1}$), ils peuvent être déminéralisés sur une chaîne d'échangeurs d'ions, non régénérables, suivant la **figure 1011.**
- pour une plus forte salinité en sodium, et si la teneur en bore reste faible, ils peuvent être traités dans un évaporateur général.

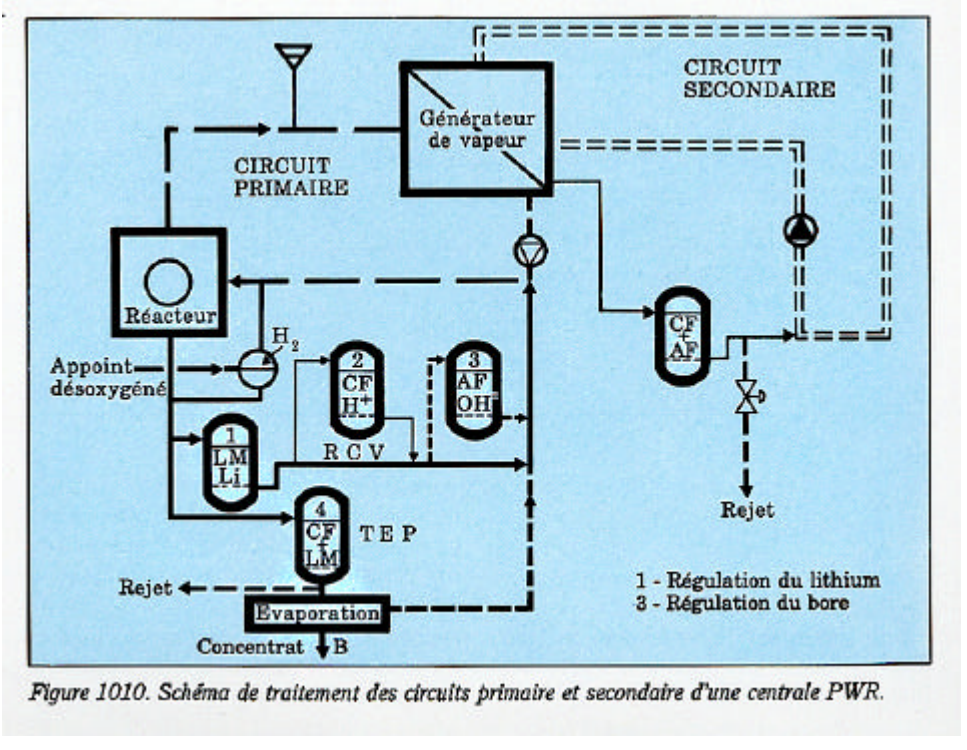


Figure 1010. Schéma de traitement des circuits primaire et secondaire d'une centrale PWR.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

13.2. USINES DE RETRAITEMENT DES COMBUSTIBLES IRRADIÉS

Les principaux traitements comprennent:

-évaporation des effluents fortement actifs et vitrification des concentrats avant confinement,

- décontamination des eaux de piscines de stockage

- par précipitation chimique (ferrocyanures, hydroxydes de fer et nickel) et incorporation des boues déshydratées dans du béton ou du bitume,

- par coprécipitation chimique en présence de résines échangeuses en poudre ou granulées et enrobage dans un polymère,

- par passage sur résines échangeuses d'ions, non régénérées et enrobées.

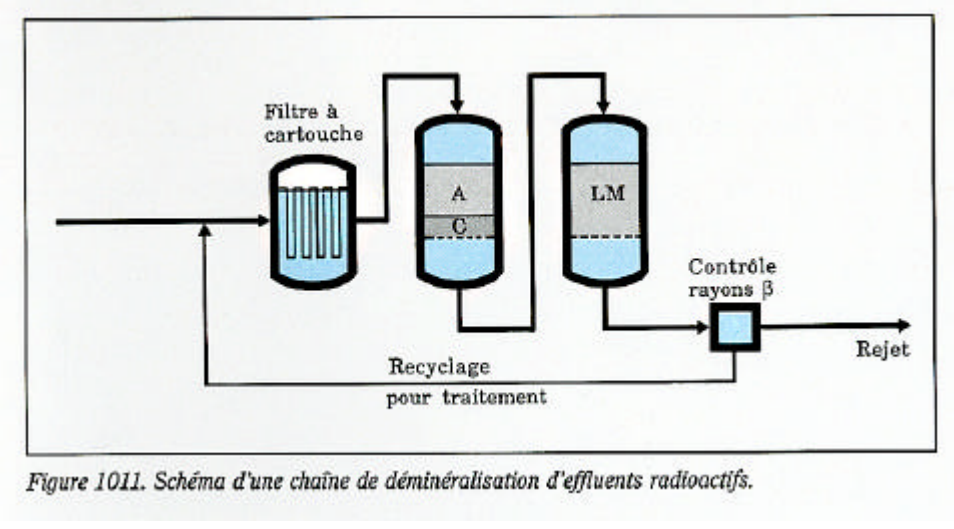


Figure 1011. Schéma d'une chaîne de déminéralisation d'effluents radioactifs.

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/

Downloaded from https://hydraulicspot.blogspot.com/